

DIN 1055-6

DIN

ICS 91.010.30

Ersatz für
DIN 1055-6:1987-05**Einwirkungen auf Tragwerke –
Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter**Actions on structures –
Part 6: Design loads for buildings and loads in silo binsActions sur les structures –
Partie 6: Charges en cellules de silos

Gesamtumfang 111 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

Inhalt

	Seite
Vorwort.....	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen.....	10
3 Begriffe und Formelzeichen	11
3.1 Begriffe	11
3.2 Formelzeichen	15
3.2.1 Allgemeines	15
3.2.2 Große lateinische Buchstaben	15
3.2.3 Kleine lateinische Buchstaben.....	17
3.2.4 Große griechische Buchstaben	20
3.2.5 Kleine griechische Buchstaben	20
4 Darstellung und Klassifikation der Einwirkungen.....	21
4.1 Darstellung von Einwirkungen in Silos	21
4.2 Darstellung der Einwirkung auf Flüssigkeitsbehälter.....	22
4.3 Einstufung der Einwirkung auf Silozellen.....	23
4.4 Einstufung der Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter	23
4.5 Anforderungsklassen.....	23
5 Bemessungssituationen	24
5.1 Allgemeines	24
5.2 Bemessungssituationen infolge von in Silos gelagerte „Schüttgüter“	24
5.3 Bemessungssituationen infolge unterschiedlicher geometrischer Ausbildungen der Silogeometrie.....	26
5.4 Bemessungssituationen infolge spezieller Konstruktionsformen von Silos	30
5.5 Bemessungssituationen infolge in Flüssigkeitsbehältern gelagerten Flüssigkeiten.....	30
5.6 Bemessungsprinzipien für Explosionen	30
6 Schüttgutkennwerte	31
6.1 Allgemeines	31
6.2 Schüttgutkennwerte	32
6.2.1 Allgemeines	32
6.2.2 Ermittlung der Schüttgutkennwerte	34
6.2.3 Vereinfachte Vorgehensweise.....	35
6.3 Messung der Schüttgutkennwerte in Versuchen	35
6.3.1 Experimentelle Ermittlung (Messverfahren)	35
6.3.2 Schüttgutwichte γ	36
6.3.3 Wandreibungskoeffizient μ	36
6.3.4 Winkel der inneren Reibung φ_1	36
6.3.5 Horizontallastverhältnis K	37
6.3.6 Kohäsion c	37
6.3.7 Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast C_{Op}	37
7 Lasten auf vertikale Silowände	38
7.1 Allgemeines	38
7.2 Schlanke Silos	39
7.2.1 Fülllasten auf vertikale Silowände.....	39
7.2.2 Entleerungslasten auf vertikale Wände.....	44
7.2.3 Gleichförmige Erhöhung der Lasten als Ersatz für die Teilflächenlasten der Lastfälle Füllen und Entleeren bei kreisförmigen Silos	49
7.2.4 Entleerungslasten für kreisförmige Silos mit großen Exzentrizitäten bei der Entleerung.....	50
7.3 Niedrige Silos und Silos mit mittlerer Schlankeit	55
7.3.1 Fülllasten auf die vertikalen Wände.....	55

	Seite
7.3.2 Entleerungslasten auf die vertikalen Silowände.....	57
7.3.3 Große Exzentrizitäten beim Befüllen von kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit.....	59
7.3.4 Große Entleerungsexzentrizitäten in kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit.....	60
7.4 Stützwandsilos	61
7.4.1 Fülllasten auf vertikale Wände.....	61
7.4.2 Entleerungslasten auf vertikale Wände	62
7.5 Silos mit fluidisiertem Schüttgut	62
7.5.1 Allgemeines	62
7.5.2 Lasten in Silos zur Lagerung von fluidisiertem Schüttgut.....	62
7.6 Temperaturunterschiede zwischen Schüttgut und Silokonstruktion	63
7.6.1 Allgemeines	63
7.6.2 Lasten infolge einer Abnahme der atmosphärischen Umgebungstemperaturen.....	64
7.6.3 Lasten infolge heiß eingefüllter Schüttgüter	64
7.7 Lasten in rechteckigen Silos.....	65
7.7.1 Rechtecksilos	65
7.7.2 Silos mit inneren Zuggliedern.....	65
8 Lasten auf Silotrichter und Siloböden	65
8.1 Allgemeines	65
8.1.1 Physikalische Kennwerte	65
8.1.2 Allgemeine Regelungen.....	67
8.2 Waagerechte Siloböden.....	69
8.2.1 Vertikallasten auf waagerechte Siloböden in schlanken Silos	69
8.2.2 Vertikallasten auf ebene Siloböden in niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit	69
8.3 Steiler Trichter	71
8.3.1 Mobilisierte Reibung	71
8.3.2 Fülllasten.....	71
8.3.3 Entleerungslasten	71
8.4 Flacher Trichter	72
8.4.1 Mobilisierte Reibung	72
8.4.2 Fülllasten.....	73
8.4.3 Entleerungslasten	73
8.5 Trichterlasten in Silos mit Luftenblasevorrichtungen	73
9 Lasten auf Flüssigkeitsbehälter.....	74
9.1 Allgemeines	74
9.2 Lasten infolge gelagerter Flüssigkeiten.....	74
9.3 Kennwerte der Flüssigkeiten	74
9.4 Soglasten infolge von unzureichender Belüftung	74
Anhang A (informativ) Grundlagen der Tragwerksplanung – Regeln in Ergänzung zu DIN 1055-100 für Silos und Flüssigkeitsbehälter	75
A.1 Allgemeines	75
A.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit	75
A.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte γ	75
A.2.2 Kombinationsbeiwerte ψ	75
A.3 Einwirkungskombinationen	75
A.4 Bemessungssituation und Einwirkungskombinationen für die Anforderungsklassen 2 und 3.....	76
A.5 Einwirkungskombinationen für die Anforderungsklasse 1.....	77
Anhang B (normativ) Einwirkungen, Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationsbeiwerte der Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter	78
B.1 Allgemeines	78
B.2 Einwirkungen.....	78
B.2.1 Lasten aus gelagerten Flüssigkeiten	78
B.2.2 Lasten aus Innendrücken	78

	Seite
B.2.3 Lasten aus Temperatur(-änderung).....	78
B.2.4 Eigenlasten	78
B.2.5 Lasten aus Dämmung	78
B.2.6 Verteilte Nutzlasten	79
B.2.7 Konzentrierte Nutzlasten	79
B.2.8 Schnee.....	79
B.2.9 Wind.....	79
B.2.10 Unterdruck durch unzureichende Belüftung	81
B.2.11 Seismische Lasten	81
B.2.12 Lasten aus Verbindungsbauten	81
B.2.13 Lasten aus ungleichförmigen Setzungen	81
B.2.14 Katastrophenlasten.....	81
B.3 Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen.....	81
B.4 Kombinationen von Einwirkungen	81
Anhang C (normativ) Messung von Schüttgutkennwerten für die Ermittlung von Silolasten	82
C.1 Allgemeines	82
C.2 Anwendung	82
C.3 Symbole.....	82
C.4 Begriffe.....	83
C.5 Probennahme und Probenvorbereitung.....	83
C.6 Bestimmung der Schüttgutwichte γ	84
C.6.1 Kurzbeschreibung	84
C.6.2 Prüfapparatur.....	84
C.6.3 Verfahren/Vorgehen	85
C.7 Wandreibung.....	85
C.7.1 Allgemeines	85
C.7.2 Wandreibungskoeffizient μ_m zur Ermittlung der Lasten	86
C.7.3 Wandreibungswinkel φ_{Wh} für Untersuchungen zum Fließverhalten.....	87
C.8 Horizontallastverhältnis K	88
C.8.1 Direkte Messung.....	88
C.8.2 Indirekte Messung.....	89
C.9 Festigkeitsparameter: Kohäsion c und Winkel der inneren Reibung φ_i	89
C.9.1 Direkte Messung.....	89
C.9.2 Indirekte Messung.....	91
C.10 Effektiver Elastizitätsmodul E_S	93
C.10.1 Direkte Messung.....	93
C.10.2 Indirekte Abschätzung	95
C.11 Bestimmung der oberen und unteren charakteristischen Werte von Schüttgutparametern und Ermittlung des Umrechnungsfaktors a	96
C.11.1 Versuchsprinzip.....	96
C.11.2 Methoden zur Abschätzung.....	97
Anhang D (normativ) Abschätzung der Schüttgutkennwerte für die Ermittlung der Silolasten	99
D.1 Ziel	99
D.2 Abschätzung des Wandreibungskoeffizienten für eine gewellte Wand.....	99
D.3 Innere Reibung und Wandreibung eines grobkörnigen Schüttgutes ohne Feinanteile	100
Anhang E (normativ) Angabe von Schüttgutkennwerten	101
Anhang F (normativ) Bestimmung der Fließprofile, Massen- und Kernfluss	102
Anhang G (normativ) Seismische Einwirkungen.....	103
G.1 Allgemeines	103
G.2 Symbole.....	103
G.3 Bemessungssituation	103
G.4 Seismische Einwirkungen	104
G.4.1 Silounterbau und Gründungen	104

	Seite
G.4.2 Silowände	104
Anhang H (normativ) Alternative Regeln zur Ermittlung von Trichterlasten	106
H.1 Allgemeines	106
H.2 Begriffe	106
H.3 Symbole	106
H.4 Bemessungssituation	106
H.5 Lasten auf die Trichterwände	107
H.6 Bestimmung der Anschlusskräfte am Trichterübergang	108
H.7 Alternative Gleichungen für den Trichterlastbeiwert F_e für den Lastfall Entleeren	108
Anhang I (normativ) Einwirkungen infolge von Staubexplosionen	109
I.1 Allgemeines	109
I.2 Anwendung	109
I.3 Zusätzliche Normen, Richtlinien und Bestimmungen	109
I.4 Explosionsfähige Stäube und ihre Kennwerte	109
I.5 Zündquellen	110
I.6 Schutzmaßnahmen	110
I.7 Bemessung der Bauteile	111
I.8 Bemessung für Explosionsüberdruck	111
I.9 Bemessung für Unterdruck	111
I.10 Sicherung der Abschlusselemente der Entlastungsöffnungen	111
I.11 Rückstoßkräfte durch Druckentlastung	111

Bilder

Bild 1 — Darstellung von Silozellen mit Benennung der geometrischen Kenngrößen und Lasten.....	9
Bild 2 — Grundlegende Fließprofile	26
Bild 3 — Fließprofile mit Schlotfluss.....	27
Bild 4 — Fließprofile mit gemischtem Schüttgutfließen.....	28
Bild 5 — Auswirkung der Schlankheit (Verhältnis Höhe zu Durchmesser) auf das gemischte Schüttgutfließen und den Schlotfluss.....	28
Bild 6 — Spezielle Füll- und Entleerungsanordnungen.....	29
Bild 7 — Bedingungen, unter denen Drücke infolge Massenfluss auftreten	32
Bild 8 — Symmetrische Fülllasten im Bereich der vertikalen Silowände	40
Bild 9 — Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten	42
Bild 11 — Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten bei Entleerung	47
Bild 12 — Fließkanal und Druckverteilung bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten.....	52
Bild 13 — Lasten in einem niedrigen Silo oder Silo mit mittlerer Schlankheit nach dem Füllen (Fülllasten)	56
Bild 14 — Fülldrücke bei exzentrisch gefüllten niedrigen Silos oder Silos mit mittlerer Schlankheit.....	59
Bild 15 — Fülldrücke in einem Stützwandsilo	62
Bild 16 — Grenze zwischen steilem und flachem Trichter.....	66

DIN 1055-6:2005-03

Bild 17 — Verteilung der Fülldrücke in einem steilen und flachen Trichter	67
Bild 18 — Bodenlasten in niedrigen Silos und in Silos mit mittlerer Schlankheit.....	70
Bild 19 — Entleerungsdrücke in einem steilen und einem flach geneigten Trichter.....	72
Bild B.1 — Druckkoeffizienten für Windlasten bei kreisförmigen zylindrischen Flüssigkeitsbehältern	80
Bild C.1 — Vorrichtung zur Bestimmung von γ	85
Bild C.2 — Prüfverfahren zur Bestimmung des Wandreibungskoeffizienten	87
Bild C.3 — Prüfverfahren zur Bestimmung von K_0	88
Bild C.4 — Prüfverfahren zur Bestimmung der Winkel der inneren Reibung φ_i und φ_c und der Kohäsion c basierend auf der beim Vorverdichten aufgebracht Spannung σ_r	90
Bild C.5 — Prüfverfahren zur Bestimmung der Elastizitätsmoduli bei Be- und Entlastung	94
Bild D.1 — Abmessungen der Profilierung der Wandoberfläche.....	100
Bild F.1 — Abgrenzung von Massen- und Kernflussbedingungen bei konischen und keilförmigen Trichtern.....	102
Bild G.1 — Mögliche Umlagerungen an der Schüttgutoberfläche infolge seismischer Einwirkungen.....	103
Bild G.2 — Seismische Einwirkungen für den Unterbau (z. B. Stützen)	104
Bild G.3 — Querschnitt durch den vertikalen Siloschaft mit Angaben zu den zusätzlichen Horizontallasten infolge seismischer Einwirkungen	105
Bild H.1 — Alternative Regeln für die Trichterlasten	108
Tabellen	
Tabelle 1 — Klassifikation von Bemessungssituationen	23
Tabelle 2 — Maßgebliche Kennwerte für die unterschiedlichen Lastansätze	25
Tabelle 3 — Kategorien der Wandoberflächen	34
Tabelle A.1 — Kombinationsbeiwerte ψ.....	77
Tabelle C.1 — Versuchsparameter	91
Tabelle C.2 — Typische Werte der Variationskoeffizienten für die Schüttgutkennwerte.....	98
Tabelle E.1 — Schüttgutkennwerte.....	101

Vorwort

Die vorliegende Norm wurde im NABau-AA 00.02.00 „Einwirkungen auf Bauten“ (Spiegelausschuss zu CEN/TC 250/SC 1) ausgearbeitet.

Die Norm ist Teil einer neuen Reihe DIN 1055 *Einwirkungen auf Tragwerke*, die aus folgenden Teilen bestehen wird:

- Teil 1: *Wichten und Flächenlasten von Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen*
- Teil 2: *Bodenkenngrößen (zz. Entwurf)*
- Teil 3: *Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten*
- Teil 4: *Windlasten*
- Teil 5: *Schnee- und Eislasten (zz. Entwurf)*
- Teil 6: *Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter*
- Teil 7: *Temperatureinwirkungen*
- Teil 8: *Einwirkungen während der Bauausführung*
- Teil 9: *Außergewöhnliche Einwirkungen*
- Teil 10: *Einwirkungen infolge Krane und Maschinen*
- Teil 100: *Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln*

Verweise auf Normen der Reihe DIN 1055 in dieser Norm beziehen sich ausschließlich auf die o. g. neue Reihe DIN 1055.

Die vorliegende Norm wurde unter Verantwortung des Arbeitsausschusses NABau 00.02.00 auf der Grundlage von DIN V ENV 1991-4 erarbeitet und stimmt weitgehend mit dem für die Formelle Umfrage vorbereiteten Entwurfsmanuskript prEN 1991-4 überein.

Abweichungen der vorliegenden Norm vom o. g. Entwurfsmanuskript prEN 1991-4 entsprechen im Wesentlichen den in diesem Papier vorgesehenen Möglichkeiten zur Festlegung des nationalen Sicherheitsniveaus, so dass bei einer späteren Übernahme von EN 1991-4 diese in einen nationalen Anhang überführt werden können.

Änderungen

Gegenüber DIN 1055-6:1987-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) strukturelle Anpassung an die zu erwartende EN 1991-4;
- b) begriffliche Anpassung an die zu erwartende EN 1991-4;
- c) Anpassung des Bemessungs- und Sicherheitskonzeptes an die zu erwartende EN 1991-4;
- d) Aufnahme von Regelungen für Einwirkungen aus Staubexplosionen;
- e) Aufnahme von Regelungen für Einwirkungen infolge Erdbeben;
- f) Aufnahme von Regelungen für Einwirkungen von Schüttguteigenschaften.

Frühere Ausgaben

DIN 1055-6: 1964-11, 1987-05

DIN 1055-6:2005-03**1 Anwendungsbereich**

(1) Diese Norm enthält allgemeine Prinzipien und Vorgaben zu den Einwirkungen für den Entwurf und die Bemessung von Silos für die Lagerung von Schüttgütern und von Flüssigkeitsbehältern. Sie ist in Verbindung mit den anderen Teilen der Reihe DIN 1055 anzuwenden.

(2) Diese Norm enthält auch einige Bestimmungen für Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter, die über die unmittelbaren Einwirkungen infolge von den gelagerten Schüttgütern oder Flüssigkeiten hinausgehen (z. B. Auswirkungen von Temperaturunterschieden).

(3) Für die Anwendung der Bemessungsregeln für Silozellen und Silobauwerke gelten folgende geometrische Begrenzungen:

— Die Querschnittsformen von Silozellen sind auf die in Bild 1d dargestellten Fälle begrenzt. Kleinere Abweichungen sind unter der Voraussetzung erlaubt, dass die möglichen Auswirkungen auf die Silostruktur infolge von aus diesen Abweichungen resultierenden Druckänderungen beachtet werden.

— Für die geometrischen Abmessungen gelten folgende Begrenzungen:

$$h_b/d_c < 10$$

$$h_b < 100 \text{ m}$$

$$d_c < 60 \text{ m}$$

— Der Übergang vom vertikalen Siloschaft in den Trichter erfolgt in einer einfachen horizontalen Ebene (auch in mehreren Stufen möglich) (siehe Bild 1a).

— Einflüsse auf die Silodrücke infolge von Einbauten oder spezielle Querschnittseinengungen bzw. Einbauten wie Entlastungskegel, Entlastungsbalken, Konsolen und Nasen usw. werden nicht erfasst (außer Entleerungstrichter).

(4) Für die Anwendung der Bemessungsregeln für Silozellen und Silobauwerke gelten hinsichtlich des gelagerten Schüttgutes folgende Anwendungsgrenzen:

— Jeder Silo ist für einen definierten Bereich von Schüttguteigenschaften zu bemessen.

— Das Schüttgut ist frei fließend oder es kann sichergestellt werden, dass es sich im speziellen Fall wie ein frei fließendes Schüttgut verhält (siehe 3.1.12 und Anhang C).

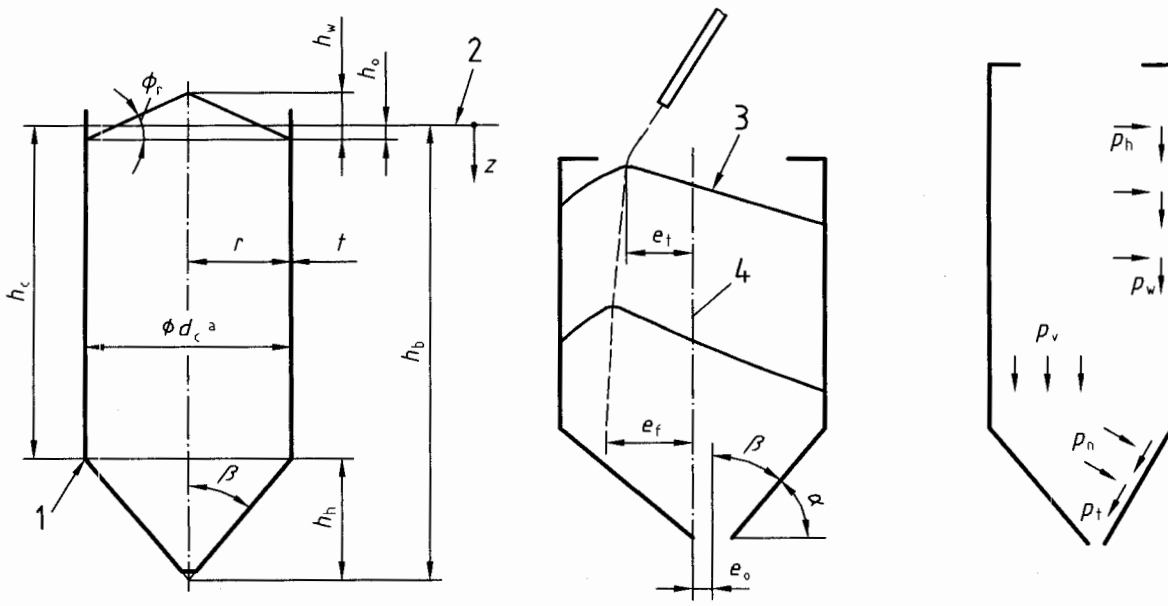
— Die maximale Korngröße des Schüttgutes ist nicht größer als $0,03 d_c$ (siehe Bild 1d).

ANMERKUNG Wenn die Schüttgutpartikel im Vergleich zur Dicke der Silowand groß sind, sind die Auswirkungen des Kontaktes einzelner großer Schüttgutpartikel mit der Wand in Form eines Ansatzes von Einzellasten zu berücksichtigen.

(5) Für die Anwendung der Bemessungsregeln für Silozellen und Silobauwerke gelten hinsichtlich der Betriebsbedingungen beim Füllen und Entleeren folgende Anwendungsgrenzen:

— Beim Befüllen entstehen nur geringfügige, vernachlässigbare Einwirkungen infolge von Trägheits- und Stoßkräften.

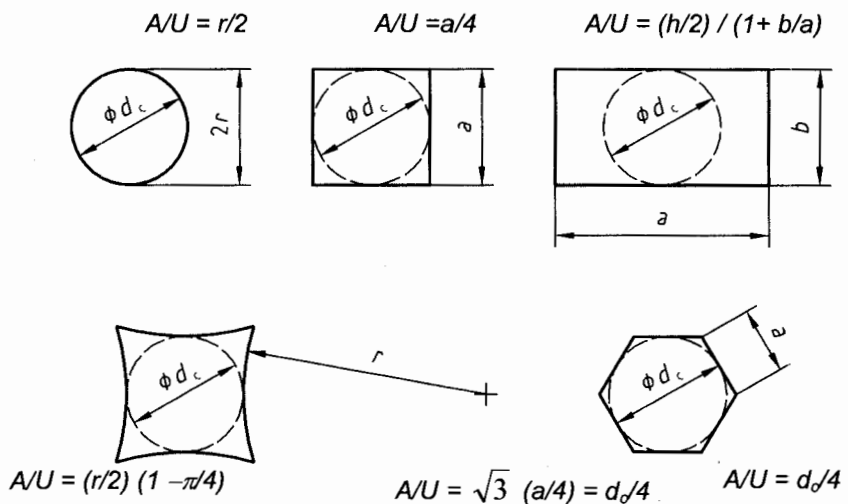
— Bei Anwendung von Austrags- bzw. Entleerungshilfen (zum Beispiel Förderanlagen (feeders) oder Zentralrohre mit Schlucköffnungen) ist der Schüttgutfluss gleichmäßig ungestört und zentral.



a) Geometrie

b) Exzentrizitäten

c) Lasten



d) Querschnittsformen

Legende

- 1 Übergang
- 2 äquivalente Schüttgutoberfläche
- 3 Oberflächenprofil bei vollem Silo
- 4 Silomittelachse

Bild 1 — Darstellung von Silozellen mit Benennung der geometrischen Kenngrößen und Lasten

Hinweis für die Überarbeitung von Bild 1: In Bild 1 wird ein weiterer Silotyp mit aufgenommen.

(6) Die angegebenen Lastansätze auf Silotrichter gelten nur für konische (i. Allg. axialsymmetrisch geformte, oder pyramidenförmig mit quadratischen bzw. rechteckigen Querschnitten ausgebildete) und keilförmig (i. Allg. mit vertikalen Wänden an der Stirn- und Rückseite) ausgebildete Trichter. Davon abweichende Trichterformen oder Trichter mit Einbauten erfordern spezielle, weitergehende Überlegungen.

DIN 1055-6:2005-03

(7) Silos mit entlang der vertikalen Achse sich ändernden Symmetrieachsen der geometrischen Grundrissform sind nicht Gegenstand dieser Norm. Darunter fallen z. B. Silos mit einem von einer Zylinderform in eine Keilform übergehenden Trichter.

(8) Die Bemessungsregeln für Flüssigkeitsbehälter gelten nur für Flüssigkeiten unter üblichem atmosphärischen Druck.

(9) Lasten auf die Dächer von Silos und Flüssigkeitsbehältern sind den entsprechenden Normen DIN 1055-3, DIN 1055-4, E DIN 1055-5, DIN 1055-9 und DIN 1055-10 zu entnehmen.

(10) Die Bemessung von Silos mit Umlaufbetrieb ist außerhalb des Anwendungsbereiches dieser Norm.

(11) Die Bemessung von Silos gegen dynamische Beanspruchungen, die beim Entleeren auftreten können, wie z. B. Silobeben, Stöße, Hupen oder Siloschlagen, ist außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Norm.

ANMERKUNG Diese Phänomene sind bis heute noch nicht ganz geklärt, so dass bei Anwendung dieser Norm weder sichergestellt werden kann, dass diese nicht auftreten werden, noch dass die Silostruktur für die daraus resultierende Beanspruchung ausreichend dimensioniert ist.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 1045-1, *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton — Teil 1: Bemessung und Konstruktion*

DIN 1055-1, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1: Wichten und Flächenlasten von Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen*

DIN 1055-3, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 3: Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten*

DIN 1055-4, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 4: Windlasten*

E DIN 1055-5, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 5: Schnee- und Eislasten*

DIN 1055-7, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 7: Temperatureinwirkungen*

DIN 1055-9, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 9: Außergewöhnliche Einwirkungen*

DIN 1055-10, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 10: Einwirkungen infolge Krane und Maschinen*

DIN 1055-100, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung; Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln*

DIN EN 26184-1, *Explosionsschutzsysteme — Teil 1: Bestimmung der Explosionskenngrößen von brennbaren Stäuben in Luft*

DIN EN 1127-1, *Explosionsfähige Atmosphären — Explosionsschutz — Teil 1: Grundlagen und Methodik*

DIN EN 50014, *Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche — Allgemeine Bestimmungen*

ISO 3898:1997, *Grundlagen für die Bemessung von Bauwerken — Bezeichnungen, Allgemeine Formelzeichen*

VDI 2263, *Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen*

VDI 3673 Blatt 1, *Druckentlastung von Staubexplosionen*

3 Begriffe und Formelzeichen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm gelten die in DIN 1055-100 angegebenen sowie die folgenden Begriffe.

3.1.1

belüfteter Siloboden

Siloboden, in welchem Schlitze (Belüftungsrinnen) angeordnet sind, durch die Luft in das Schüttgut injiziert wird, um Schüttgutfließen im Bereich oberhalb des Silobodens zu aktivieren (siehe Bild 6b)

3.1.2

innerer Durchmesser eines Siloquerschnittes d_c

der Durchmesser des größten eingeschriebenen Kreises des inneren Querschnittes einer Silozelle (siehe Bild 1d)

3.1.3

kreisförmiger Silo

Silo, dessen Grundriss bzw. Schaftquerschnitt eine Kreisform aufweist (siehe Bild 1d)

3.1.4

Kohäsion

Scherfestigkeit des Schüttgutes in dem Fall, dass in der Bruchebene keine Normalspannungen wirken

3.1.5

konischer Trichter

Trichter, bei dem die geneigten Seitenflächen in einem Punkt zusammenlaufen, womit in der Regel ein axialsymmetrisches Schüttgutfließen sichergestellt werden kann

3.1.6

exzentrisches Entleeren

Fließprofil im Schüttgut mit einer in Bezug auf die vertikale Mittelachse unsymmetrischen Verteilung des sich bewegenden Schüttgutes. Dies ist üblicherweise die Folge einer exzentrisch angeordneten Auslauföffnung (siehe Bilder 3c und 3d, 4b und 4c). Es kann aber auch durch andere zur Unsymmetrie führende Phänomene hervorgerufen sein (siehe Bild 5d)

3.1.7

exzentrisches Füllen

Zustand während bzw. nach dem Befüllen des Silos, bei dem die Spitze der angeschütteten Schüttgutoberfläche (Spitze des Anschüttkegels) nicht mehr in der vertikalen Mittelachse des Silos zentriert ist (siehe Bild 1b)

3.1.8

äquivalente Schüttgutoberfläche

Höhe der gedachten eingeebneten (horizontalen) Schüttgutoberfläche, die sich aus der Volumenbilanz zwischen diesem gedachten und dem tatsächlichen Verlauf der Oberflächenform ergibt (siehe Bild 1a)

3.1.9

Trichter für „erweitertes Fließen“ (en: „expanded flow“)

Trichter, bei dem die Trichterseitenflächen im unteren Bereich des Trichters ausreichend steil ausgebildet sind, um einen Massenfluss zu erzeugen, während der Trichter im oberen Bereich flacher geneigte Seitenflächen aufweist, wodurch dort Kernfluss zu erwarten ist (siehe Bild 6d). Diese Anordnung reduziert die Trichterhöhe bei gleichzeitiger Sicherstellung einer zuverlässigen Entleerung

3.1.10

waagerechter (Silo)boden

innere Grundfläche eines Silos mit einer Neigung von weniger als 5°

DIN 1055-6:2005-03**3.1.11****Fließprofil**

geometrische Form des ausfließenden Schüttgutes, wenn sich diese bereits voll ausgebildet hat (siehe Bilder 2 bis 5). Der Silo ist dabei fast vollständig gefüllt (maximaler Füllzustand)

3.1.12**fluidisiertes Schüttgut**

Zustand eines gespeicherten staubförmigen Schüttgutes, in dem dieses einen großen Anteil von Luftporen enthält, mit einem Druckgradienten der dem Gewicht der Partikel entgegenwirkt und dieses kompensiert. Die Luft kann entweder durch eine spezielle Belüftung oder durch den Füllprozess eingetragen sein. Ein Schüttgut wird als teilweise fluidisiert bezeichnet, wenn nur ein Teil des Gewichtes der Schüttgutpartikel durch den Porendruckgradienten kompensiert wird

3.1.13**frei fließendes granulares Material**

granulares Schüttgut, dessen Fließverhalten nicht merklich von Kohäsion beeinflusst ist

3.1.14**vollständig gefüllter Zustand**

ein Silo ist im vollständig gefüllten Zustand, wenn sich die Oberfläche des Schüttgutes an ihrer höchstmöglichen Position befindet, die sie innerhalb der Nutzungsdauer der Konstruktion während des Silobetriebs einnehmen kann

ANMERKUNG Dies wird für den Silo als die maßgebliche Bemessungsbedingung angenommen.

3.1.15**Kernfluss**

Fließprofil, bei dem sich im Schüttgut ein Fließkanal über der Auslauföffnung entwickelt, während das Schüttgut im Bereich zwischen diesem Fließkanal und der Silowand in Ruhe verbleibt (siehe Bild 2)

ANMERKUNG Der Fließkanal kann hierbei in Kontakt mit der vertikalen Silowand kommen – man spricht dann von „gemischtem Fließen“ – oder er kann sich ohne jegliche Kontaktbereiche mit der Wand bis zur Oberfläche hin erstrecken. Dieser Fall wird mit „Schlotfluss“ oder „Schachtfliessen“ bezeichnet.

3.1.16**granulares Material**

Material, das sich aus einzelnen voneinander getrennten Körnern aus festen Partikeln zusammensetzt, mit Partikeln in etwa gleicher Größenordnung, bei dem bei der Ermittlung der Lasten die zwischen den Einzelkörnern befindliche Luft nur eine geringe Rolle spielt und auf das Schüttgutfließen nur geringen Einfluss hat

3.1.17**hohe Füllgeschwindigkeiten**

Bedingung in einem Silo, bei der die Geschwindigkeit des Einfüllens zu einem Lufteintrag in einer Größenordnung führt, sodass dadurch die Druckverhältnisse an der Wand beeinflusst werden

3.1.18**Homogenisierungssilo**

Silo, in dem das Schüttgut unter Zuhilfenahme von Fluidisierung homogenisiert, d. h. durch Mischung vergleichmäßig wird

3.1.19**Trichter**

Siloboden mit geneigten Wänden

3.1.20**Trichterlastverhältniswert F**

Wert, der angibt, in welchem Verhältnis die Normallast p_n auf die geneigten Trichterwände und die mittlere Vertikallast p_v an dieser Stelle im Schüttgut zueinander stehen

3.1.21**Silo mit mittlerer Schlankheit**

Silo, dessen Verhältnis von Höhe zum Durchmesser zwischen $1,0 < h_c/d_c < 2,0$ liegt

ANMERKUNG Ausnahmen sind in 5.3 definiert.

3.1.22**innerer Schlotfluss**

Fließprofil mit Schlotfluss, in dem die Fließkanalgrenze sich bis zur Schüttgutoberfläche erstreckt, ohne dass es dabei zu Berührungen des Fließbereiches mit der Silowand kommt (siehe Bilder 2 und 3)

3.1.23**Horizontallastverhältnis K**

Wert, der angibt, in welchem Verhältnis die auf die vertikale Silowand wirkende mittlere Horizontallast p_h und die mittlere Vertikallast p_v an dieser Stelle im Schüttgut zueinander stehen

3.1.24**geringe Kohäsion**

eine Schüttgutprobe weist eine geringe Kohäsion auf, wenn die Kohäsion c kleiner als 4 % der Vorkonsolidierungsspannung σ_r ist

ANMERKUNG Ein Verfahren zur Bestimmung der Kohäsion ist in C.9 gegeben.

3.1.25**Massenfluss**

Fließprofil, bei dem alle im Silo befindlichen Schüttgutpartikel beim Entleeren gleichzeitig in Bewegung sind (siehe Bild 2a)

3.1.26**gemischtes Fließen**

Kernflussprofil, bei dem der Fließkanal noch unterhalb der Schüttgutoberfläche mit der vertikalen Silowand in Berührung kommt (siehe Bilder 2c und 4)

3.1.27**nicht kreisförmiger Silo**

Silo, dessen Querschnitt von der Kreisform abweicht (siehe Bild 1d)

3.1.28**Schüttgut**

Bezeichnung für ein staubförmiges bis grobkörniges granulares Material mit und ohne Kohäsion, das neben einzelnen Feststoffteilchen (Partikel) auch Hohlräume zwischen diesen enthält, die evtl. mit Luft oder Feuchtigkeit gefüllt sind

3.1.29**Teilflächenlast**

lokale Last, die in beliebiger Höhenlage auf eine bestimmte Teilfläche senkrecht zur vertikalen Silowand wirkend angesetzt wird

3.1.30**Schlotfluss**

Fließprofil, in dem das Schüttgut in einem vertikalen oder nahezu vertikalen Fließkanal oberhalb der Auslauföffnung in Bewegung ist, sich aber neben dem Fließkanal in Ruhe befindet (siehe Bilder 2 und 3)

DIN 1055-6:2005-03

ANMERKUNG Wenn die Auslauföffnung exzentrisch angeordnet ist (siehe Bilder 3c und d), oder wenn spezielle Faktoren dazu führen, dass der Fließkanal von der vertikalen Achse über dem Auslauf abweicht (siehe Bild 5), kann sich ein Schüttgutfließen gegen die Silowand einstellen.

3.1.31**ebenes Fließen**

Fließprofil in einem Silo mit rechteckiger oder quadratischer Querschnittsfläche und einer schlitzförmigen Auslauföffnung. Der Auslaufschlitz verläuft parallel zu zwei Silowänden. Seine Länge entspricht der Länge dieser beiden Silowände

3.1.32**staubförmiges Schüttgut**

ein Material, dessen mittlere Partikelgröße kleiner als 0,05 mm ist

3.1.33**Stützwandsilo**

Silo mit einem waagerechten Boden und einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $h_c/d_c \leq 0,4$

3.1.34**flacher Trichter**

Trichter, in dem nach dem Befüllen nicht der volle Betrag der Wandreibung mobilisiert wird

3.1.35**Silo**

Behälterkonstruktion zur Speicherung von Schüttgütern

3.1.36**schlanker Silo**

Silo mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $h_c/d_c \geq 2,0$ oder bei dem die zusätzlichen Bedingungen nach 5.3 erfüllt sind

3.1.37**Schlankheit**

Verhältnis von Höhe zu Durchmesser h_c/d_c des vertikalen Teils eines Silos

3.1.38**niedriger Silo**

Silo mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $0,4 < h_c/d_c \leq 1,0$ oder bei dem die zusätzlichen Bedingungen nach 5.3 erfüllt sind

ANMERKUNG Bei einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $h_c/d_c \leq 0,4$ und wenn der Silo einen Trichter besitzt, fällt der Silo auch unter die Kategorie eines niedrigen Silos. Ansonsten – bei einem ebenen Siloboden – fällt er unter die Kategorie Stützwandsilo.

3.1.39**steiler Trichter**

Trichter, in dem nach dem Befüllen die volle Wandreibung mobilisiert wird

3.1.40**Spannung im Schüttgut**

Kraft durch Flächeneinheit innerhalb des gespeicherten Schüttgutes

3.1.41**Flüssigkeitsbehälter**

Behälterkonstruktion zur Lagerung von Flüssigkeiten

3.1.42**dickwandiger Silo**

Silo mit einem Verhältnis von Durchmesser zur Wanddicke von kleiner als $d/t = 200$

3.1.43**dünnwandiger kreisförmiger Silo**

kreisförmiger Silo mit einem Verhältnis von Durchmesser zur Wanddicke von größer als $d/t = 200$

3.1.44**Wandreibungslast**

Kraft durch Flächeneinheit entlang der Silowand (vertikal oder geneigt) aufgrund der Reibung zwischen Schüttgut und Silowand

3.1.45**Trichterübergang**

Schnittfläche zwischen Trichter und vertikalem Siloschaft, d. h. Übergang vom vertikalen Teil des Silos in den Trichter

3.1.46**vertikaler Siloschaft**

der Teil eines Silos mit vertikalen Wänden

3.1.47**keilförmiger Trichter**

Trichter, bei dem die geneigten Flächen zu einem Schlitz mit dem Ziel eines ebenen Schüttgutflusses konvergieren. Die jeweils anderen beiden Trichterwände verlaufen in der Regel vertikal.

3.2 Formelzeichen**3.2.1 Allgemeines**

Eine Liste von grundlegenden Symbolen (Kurzzeichen) ist in DIN 1055-100 enthalten. Im Folgenden werden zusätzliche Kurzzeichen (Symbole) für diesen Teil der Norm angegeben. Die verwendeten Kurzzeichen basieren auf den Konventionen von ISO 3898:1997.

3.2.2 Große lateinische Buchstaben

- A Querschnittsfläche des vertikalen Schaftes
- A_c Querschnittsfläche des Fließkanals beim exzentrischen Entleeren (große Exzentrizitäten)
- B Tiefenparameter bei exzentrisch befüllten niedrigen Silos
- C Lastvergrößerungsfaktor
- C_o Entleerungsfaktor (Lastvergrößerungsfaktor beim Entleeren) für das Schüttgut
- C_{op} Schüttgutkennwert der Teilflächenlast (Lastvergrößerungsfaktor)
- C_b Vergrößerungsfaktor für die Bodenlasten
- C_h Lastvergrößerungsfaktor der horizontalen Entleerungslasten
- C_{pe} Lastvergrößerungsfaktor der Teilflächenlast beim Entleeren
- C_{pf} Lastvergrößerungsfaktor der Teilflächenlast beim Lastfall Füllen

DIN 1055-6:2005-03

- C_S Schlankheitsbeiwert bei einem Silo mit mittlerer Schlankheit
- C_T Lastvergrößerungsfaktor bei der Berücksichtigung von Temperaturunterschieden bzw. -änderungen
- C_w Entleerungsbeiwert für die Wandreibungslasten (Lastvergrößerungsfaktor)
- E Verhältnis von Exzentrizität beim Füllen und Entleeren zum Siloradius
- E_s effektiver Elastizitätsmodul des gespeicherten Schüttgutes beim betreffenden Spannungsniveau
- E_w Elastizitätsmodul der Silowand
- F Verhältnis zwischen den Lasten senkrecht auf die Trichterwand und mittlerer Vertikallast im Schüttgut an dieser Stelle
- F_e Lastverhältnis im Trichter während der Entleerung (Verhältnis zwischen Lasten senkrecht auf die Trichterwand und mittleren Vertikallasten im Schüttgut)
- F_f Lastverhältnis im Trichter nach dem Füllen (Verhältnis zwischen Lasten senkrecht auf die Trichterwand und mittleren Vertikallasten im Schüttgut)
- F_{pe} Integral der horizontalen Teilflächenlast bei dünnwandigen kreisförmigen Silos beim Lastfall Entleeren
- F_{pf} Integral der horizontalen Teilflächenlast bei dünnwandigen kreisförmigen Silos beim Lastfall Füllen
- G Verhältnis zwischen dem Radius des Fließkanals und dem Radius des inneren Querschnittes eines kreisförmigen Silos
- K charakteristischer Wert des Horizontallastverhältnisses
- K_m Mittelwert des Horizontallastverhältnisses
- K_o Wert von K bei Ausschluss von horizontalen Dehnungen sowie horizontal und vertikal gerichteten bzw. verlaufenden Hauptspannungen
- P_{we} charakteristischer Wert der aufsummierten Wandreibungslasten je laufendem Meter in Umfangsrichtung der vertikalen Silowand im Lastfall Entleeren
- P_{wf} charakteristischer Wert der aufsummierten Wandreibungslasten je laufendem Meter in Umfangsrichtung der vertikalen Silowand im Lastfall Füllen
- P_{zSk} charakteristischer Wert der Wandlasten je laufendem Meter in Umfangsrichtung der vertikalen Silowand bei niedrigen Silos und großen Füllexzentrizitäten
- S Geometriefaktor für die Trichterlasten (= 2 bei konisch geformten Trichtern, = 1 bei keilförmigen Trichtern)
- U innerer Umfang des Querschnittes des vertikalen Siloschaftes
- U_{sc} (innere) Umfangslänge des Fließkanals im Kontaktbereich zum nichtfließenden Bereich des Schüttgutes bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- U_{wc} (innere) Umfangslänge des Fließkanals im Kontaktbereich mit der Silowand bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten

- Y Tiefenvariationsfunktion: Funktion zur Beschreibung der Lastzunahme mit zunehmender Tiefe im Silo
- Y_J Tiefenvariationsfunktion der Theorie nach Janssen
- Y_R Tiefenvariationsfunktion bei niedrigen Silos

3.2.3 Kleine lateinische Buchstaben

- a Seitenlänge eines Silos mit rechteckigem oder hexagonalem Querschnitt (siehe Bild 1d)
- a_x Streukoeffizient (-faktor) bzw. Umrechnungsfaktor zur Berechnung der oberen und unteren charakteristischen Schüttgutkennwerte aus den Mittelwerten
- a_K Streukoeffizient bzw. Umrechnungsfaktor für das Horizontallastverhältnis
- a_γ Streukoeffizient bzw. Umrechnungsfaktor für die Schüttgutwichte
- a_φ Streukoeffizient bzw. Umrechnungsfaktor für den Winkel der inneren Reibung
- a_μ Streukoeffizient (-faktor) bzw. Umrechnungsfaktor für den Wandreibungskoeffizienten
- b Breite eines rechteckigen Silos (siehe Bild 1d)
- b empirischer Koeffizient für die Trichterlasten
- c Kohäsion des Schüttgutes
- d_c charakteristische Abmessung für den inneren Siloquerschnitt (siehe Bild 1d)
- e der größere Wert der Exzentrizitäten e_f und e_o
- e_c Exzentrizität der Mittelachse des Fließkanals beim Entleeren mit großen Exzentrizitäten (siehe Bild 11)
- e_f größte Exzentrizität des Schüttkegels an der Schüttgutoberfläche beim Füllen (siehe Bild 1b)
- $e_{f,cr}$ größte Füllexzentrizität, für die die vereinfachten Regeln zur Berücksichtigung geringer Exzentrizitäten verwendet werden können ($e_{f,cr} = 0,25d_c$)
- e_o Exzentrizität des Mittelpunktes der Auslauföffnung (siehe Bild 1b)
- $e_{o,cr}$ größte Exzentrizität der Auslauföffnung, für die die vereinfachten Regeln zur Berücksichtigung der Exzentrizitäten verwendet werden können ($e_{o,cr} = 0,25d_c$)
- e_t Exzentrizität der Spitze des Aufschüttkegels an der Schüttgutoberfläche beim gefüllten Silo (siehe Bild 1b)
- $e_{t,cr}$ größte Exzentrizität des Aufschüttkegels, für die die vereinfachten Regeln zur Berücksichtigung von Exzentrizitäten verwendet werden können ($e_{t,cr} = 0,25d_c$)
- h_b Gesamthöhe eines Silos mit Trichter, gemessen von der gedachten Trichterspitze bis zur äquivalenten Schüttgutoberfläche (siehe Bild 1a)

DIN 1055-6:2005-03

- h_c Höhe der vertikalen Siloschaftes, gemessen vom Trichterübergang bis zur äquivalenten Schüttgutoberfläche (siehe Bild 1a)
- h_h Trichterhöhe, gemessen von der gedachten Trichterspitze bis zum Trichterübergang (siehe Bild 1a)
- h_o Abstand zwischen äquivalenter Schüttgutoberfläche und dem tiefsten Fußpunkt des Schüttkegels (am tiefsten gelegener Punkt der Silowand, der bei einem bestimmten Füllzustand nicht in Kontakt mit dem gespeicherten Schüttgut ist) (siehe Bilder 1, 13 und 17)
- h_{tp} Gesamthöhe des Anschüttkegels an der Schüttgutoberfläche (vertikaler Abstand vom tiefsten Punkt der Silowand, der bei einem bestimmten Füllzustand nicht in Kontakt mit dem gespeicherten Schüttgut ist, bis zur Spitze des Aufschüttkegels) (siehe Bilder 1a und 17)
- n Parameter in den Bestimmungsgleichungen der Trichterlasten
- p Last in der Einheit Kraft pro Fläche
- ρ_h Horizontallast aus dem gespeicherten Schüttgut (siehe Bild 1c)
- ρ_{hae} Horizontallast im sich in Ruhe befindlichen Bereich des Schüttgutes neben dem Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- ρ_{hce} Horizontallast im Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- ρ_{hco} asymptotische Horizontallast in großer Tiefe im Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- ρ_{he} Horizontallasten beim Entleeren
- $\rho_{he,u}$ Horizontallasten beim Entleeren und Verwendung der vereinfachten Rechenverfahren
- ρ_{hf} Horizontallasten nach dem Füllen
- ρ_{hfb} Horizontallasten nach dem Füllen am unteren Ende des vertikalen Siloschaftes
- $\rho_{hf,u}$ Horizontallasten nach dem Füllen bei Anwendung der vereinfachten Rechenverfahren
- ρ_{ho} asymptotische Horizontallasten in großer Tiefe aus gespeichertem Schüttgut
- ρ_{hse} Horizontallasten im sich in Ruhe befindlichen Schüttgut in größerem Abstand zum Fließkanal während einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- ρ_{hT} Zunahme der Horizontallasten infolge Temperaturunterschieden bzw. -änderungen
- ρ_n Lasten senkrecht auf die Trichterwände aus dem gelagerten Schüttgut (siehe Bild 1c)
- ρ_{ne} Lasten senkrecht auf die Trichterwände während der Entleerung
- ρ_{nf} Lasten senkrecht auf die Trichterwände nach dem Füllen
- ρ_p Teilflächenlast
- ρ_{pe} Grundwert der Teilflächenlast während des Entleerens

- ρ_{pei} komplementäre Teilflächenlast beim Entleeren
- $\rho_{pe,nc}$ streifenförmige Teilflächenlast bei Silos mit nicht kreisförmigen Querschnitten beim Entleeren
- ρ_{pf} Grundwert der Teilflächenlast nach dem Füllen
- ρ_{pfi} komplementäre Teilflächenlast nach dem Füllen
- $\rho_{pe,nc}$ streifenförmige Teilflächenlast bei Silos mit nicht kreisförmigen Querschnitten nach dem Füllen
- ρ_{pes} Teilflächenlast an der Zylinderkoordinate θ bei dünnwandigen kreisförmigen Silos während der Entleerung
- ρ_{pfs} Teilflächenlast an der Zylinderkoordinate θ bei dünnwandigen kreisförmigen Silos nach dem Füllen
- ρ_t Reibungslasten im Trichter (siehe Bild 1c)
- ρ_{te} Reibungslasten im Trichter beim Entleeren
- ρ_{tf} Reibungslasten im Trichter nach dem Füllen
- ρ_v Vertikallasten im Schüttgut (siehe Bild 1c)
- ρ_{vb} Vertikallasten am Boden niedriger Silos
- ρ_{vf} Vertikallasten im Schüttgut nach dem Füllen
- ρ_{vft} Vertikallasten nach dem Füllen am Trichterübergang (Fußpunkt des vertikalen Siloschaftes)
- ρ_{vho} am Fußpunkt des Anschüttkegels an der Schüttgutoberfläche nach Gleichung (86) und mit der Schüttguttiefe $z = h_o$ berechnete Vertikallast
- ρ_{vsq} Vertikallasten auf dem waagerechten Boden eines niedrigen Silos oder Silos mittlerer Schlankheit
- ρ_{vtp} geostatische Vertikallast am Fußpunkt des Anschüttkegels an der Schüttgutoberfläche
- ρ_w Wandreibungslasten entlang der vertikalen Wand (Scherkraft infolge Reibung je Flächeneinheit) (siehe Bild 1c)
- ρ_{wae} Wandreibungslasten im sich in Ruhe befindlichen Schüttgut unmittelbar neben dem Fließkanal während der Entleerung mit großen Exzentrizitäten (am Übergang vom ruhenden zum fließenden Schüttgut)
- ρ_{wce} Wandreibungslasten im Fließkanal während der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- ρ_{we} Wandreibungslasten während der Entleerung
- $\rho_{we,u}$ Wandreibungslasten während der Entleerung unter Verwendung des vereinfachten Berechnungsverfahrens
- ρ_{wf} Wandreibungslasten nach dem Füllen
- $\rho_{wf,u}$ Wandreibungslasten nach dem Füllen unter Verwendung des vereinfachten Berechnungsverfahrens

DIN 1055-6:2005-03

- ρ_{wse} Wandreibungslasten im sich in Ruhe befindlichen Schüttgut in größerem Abstand zum Fließkanal während der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- r äquivalenter Siloradius ($r = 0,5d_c$)
- r_c Radius des exzentrischen Fließkanals bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- s Abmessung der mit der Teilflächenlast belasteten Fläche ($s = \pi d_c / 16 \approx 0,2d_c$)
- t Dicke der Silowand
- x vertikale Koordinate im Trichter mit dem Ursprung in der Trichterspitze (siehe Bild 16)
- z Tiefe unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche im gefüllten Zustand (siehe Bild 1a)
- z_o charakteristische Tiefe nach der Theorie nach Janssen
- z_{oc} charakteristische Tiefe nach der Theorie nach Janssen für den Fließkanal bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- z_p Tiefe des Mittelpunktes der Teilflächenlast unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche in einem dünnwandigen Silo
- z_s Tiefe unterhalb der höchstliegenden Kontaktstelle zwischen Schüttgut und Silowand (siehe Bilder 13 und 14)
- z_v Maß für die Tiefe beim Ansatz der Vertikallasten in niedrigen Silos

3.2.4 Große griechische Buchstaben

- Δ Horizontalverschiebung des oberen Teils einer Scherzelle
- Δ Operator für inkrementelle Größen (siehe folgende Kurzzeichen)
- ΔT Temperaturunterschied zwischen dem gespeicherten Schüttgut und der Silowand
- Δv bei Materialuntersuchungen gemessene inkrementelle Vertikalverschiebung
- $\Delta \sigma$ bei Materialuntersuchungen auf eine Probe aufgebrachte inkrementelle Spannung

3.2.5 Kleine griechische Buchstaben

- α mittlerer Neigungswinkel der Trichterwände bezogen auf die Horizontale (siehe Bild 1b)
- α_w thermischer Ausdehnungskoeffizient der Silowand
- β Neigungswinkel der Trichterwand bezogen auf die Vertikale (siehe Bilder 1a und 1b) bzw. der Winkel der steilsten Trichterwände bei einem quadratischen oder rechteckigen Trichter
- γ charakteristischer Wert der Wichte der gespeicherten Flüssigkeit oder des gespeicherten Schüttgutes
- γ_1 Wichte des Schüttgutes in fluidisiertem Zustand

γ_u	oberer charakteristischer Wert der Wichte der gespeicherten Flüssigkeit oder des gespeicherten Schüttgutes
δ	Standardabweichung eines Kennwertes
θ	Zylinderkoordinate: Winkel in Umfangsrichtung
θ_c	Umfangswinkel des Fließkanals beim Entleeren mit großen Exzentrizitäten (siehe Bild 11) bezogen auf die Mittelachse des Siloschaftes
ψ	Wandkontaktwinkel des exzentrischen Fließkanals bezogen auf die Mittelachse des Fließkanals
μ	charakteristischer Wert des Wandreibungswinkels an der vertikalen Silowand
μ_{heff}	effektiver oder mobilisierter Wandreibungskoeffizient in einem flachen Trichter
μ_h	Wandreibungskoeffizient im Trichter
μ_m	Mittelwert des Wandreibungskoeffizienten zwischen Schüttgut und Silowand
ν	Poissonzahl des Schüttgutes
φ_c	charakteristischer Wert des Winkels der inneren Reibung eines vorverdichteten Schüttgutes bei Entlastung (d. h. mit Anteil aus Kohäsion)
φ_i	charakteristischer Wert des Winkels der inneren Reibung eines Schüttgutes bei Erstbelastung (d. h. ohne Anteil aus Kohäsion)
φ_{im}	Mittelwert des Winkels der inneren Reibung
φ_r	Böschungswinkel eines Schüttgutes (konischer Schütthaufen) (siehe Bild 1a)
φ_w	Wandreibungswinkel ($\arctan \mu$) zwischen Schüttgut und Trichterwand
φ_{wh}	Wandreibungswinkel im Trichter ($\arctan \mu_h$) zwischen Schüttgut und Trichterwand
σ_r	Bezugs- bzw. Referenzspannung für die Versuche zur Bestimmung der Schüttgutkennwerte

4 Darstellung und Klassifikation der Einwirkungen

4.1 Darstellung von Einwirkungen in Silos

(1) Die Einwirkungen auf Silos sind unter Berücksichtigung der Silostruktur, der Eigenschaften der gespeicherten Schüttgüter und der sich beim Entleeren der Silos einstellenden Fließprofile zu ermitteln.

(2) Unsicherheiten bezüglich der sich einstellenden Fließprofile, des Einflusses der Füll- und Entleerungsexzentrizitäten auf die Füll- und Entleerungsvorgänge, des Einflusses der Siloform auf die Art des Fließprofils und bezüglich der zeitabhängigen Füll- und Entleerungsdrücke sind zu berücksichtigen.

ANMERKUNG 1 Die Größenordnung und die Verteilung der Bemessungslasten hängen von der Silostruktur, von den Materialkennwerten der gelagerten Schüttgüter und von den Fließprofilen ab, die sich beim Entleeren ausbilden. Die inhärenten Unterschiede in den Eigenschaften der unterschiedlich gelagerten Schüttgüter und die Vereinfachungen in den Lastmodellen führen zu Abweichungen zwischen den tatsächlich auftretenden Silolasten und den Lastannahmen

DIN 1055-6:2005-03

(Bemessungslasten) nach den Abschnitten 5 und 6. So ändert sich mit der Zeit zum Beispiel auch die Verteilung der Entleerungsdrücke entlang der Silowand. Eine genaue Vorhersage des vorherrschenden mittleren Drucks, seiner Streuung und seiner zeitlichen Veränderlichkeit ist mit den heutigen Erkenntnissen nicht möglich.

(3) Lasten auf die vertikalen Wände von Silos im Füllzustand und während des Entleerens mit geringen Füll- und Entleerungsexzentrizitäten sind durch einen symmetrischen Lastanteil und eine unsymmetrische Teilflächenlast zu berücksichtigen. Bei größeren Exzentrizitäten sind die Lasten durch unsymmetrische Druckverteilungskurven zu beschreiben.

(4) Reagiert die gewählte Form der Silostruktur empfindlich gegenüber Änderungen der anzusetzenden Lastvorgaben, ist dies durch entsprechende Untersuchungen zu berücksichtigen.

(5) Die symmetrischen Lasten auf Silowände sind durch horizontale Lastanteile p_h auf die inneren Oberflächen der senkrechten Silowand, durch senkrecht auf geneigte Wände wirkende Lasten p_n , durch in tangentialer Richtung der Wand wirkende Reibungslasten p_w und p_t und durch vertikale Lastanteile im gelagerten Schüttgut p_v anzusetzen (siehe Bild 1c).

(6) Die unsymmetrischen Lasten auf die vertikalen Silowände bei geringen Füll- und Entleerungsexzentrizitäten sind durch den Ansatz einer Teilflächenlast zu berücksichtigen. Diese Teilflächenlasten bestehen aus lokal wirkenden Horizontaldrücken p_h auf die innere Oberfläche der Silowand.

(7) Die unsymmetrischen Lasten auf die vertikalen Silowände bei großen Füll- und Entleerungsexzentrizitäten sind zusätzlich durch eine unsymmetrische Verteilung der Horizontaldrücke p_h und Reibungslasten p_w zu erfassen.

(8) Unplanmäßige nicht berücksichtigte Lasteinflüsse sind durch Lastvergrößerungsfaktoren C zu erfassen.

(9) Die Lastvergrößerungsfaktoren C bei Silozellen der Anforderungsklassen 2 und 3 (siehe 4.5) erfassen ausschließlich nicht berücksichtigte zusätzliche Lasteinflüsse, die durch den Schüttgutfluss beim Entleeren des Silos auftreten.

(10) Die Lastvergrößerungsfaktoren C bei Silozellen der Anforderungsklasse 1 (siehe 4.5) erfassen sowohl zusätzliche Lasteinflüsse beim Entleeren infolge der Schüttgutbewegungen als auch Einflüsse durch die Streuung der Schüttgutparameter.

ANMERKUNG 2 Die Lastvergrößerungsfaktoren C haben die Aufgabe, die Unsicherheiten bezüglich der sich einstellenden Fließprofile, die Einflüsse von Exzentrizitäten beim Füllen und Entleeren, den Einfluss der Siloform auf die Art des Fließprofils und Näherungseinflusses infolge der Nichtberücksichtigung vorhandener zeitabhängiger Füll- und Entleerungsdrücke abzudecken. Für Silos der Anforderungsklasse 1 (siehe 4.5) berücksichtigt der Lastvergrößerungsfaktor auch die inhärente Streuung der Materialeigenschaften der Schüttgüter. Für Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 wird die Streuung der die Lasten beeinflussenden Materialkennwerte der Schüttgüter nicht durch einen Lastvergrößerungsfaktor C , sondern durch den Ansatz von entsprechenden charakteristischen Bemessungswerten der Schüttgutparameter γ , μ , K und φ_1 berücksichtigt.

(11) Für Silos der Anforderungsklasse 1 (siehe 4.5) sind die unsymmetrischen Lasten durch eine Erhöhung der symmetrischen Lasten durch Verwendung eines Vergrößerungsfaktors für die Entleerungslasten C zu berücksichtigen.

(12) Für Silos der Anforderungsklasse 2 (siehe 4.5) können die unsymmetrischen Teilflächenlasten auch alternativ durch eine ersatzweise Vergrößerung der symmetrischen Lasten berücksichtigt werden.

4.2 Darstellung der Einwirkung auf Flüssigkeitsbehälter

(1) Lasten auf Flüssigkeitsbehälter infolge ihrer Füllung sind durch hydrostatische Lastansätze zu berücksichtigen.

4.3 Einstufung der Einwirkung auf Silozellen

- (1) Lasten infolge von in Silozellen gelagerten Schüttgütern sind als veränderliche Einwirkungen nach DIN 1055-100 einzustufen.
- (2) Symmetrische Lasten auf Silos sind als veränderliche ortsfeste Einwirkungen nach DIN 1055-100 einzustufen.
- (3) Teilflächenlasten zur Berücksichtigung der Füll- und Entleerungsprozesse in Silozellen sind als veränderliche freie Einwirkungen nach DIN 1055-100 einzustufen.
- (4) Exzentrische Lasten zur Berücksichtigung exzentrischer Füll- und Entleerungsprozesse in Silozellen sind als veränderliche ortsfeste Einwirkungen einzustufen.
- (5) Lasten aus Luft- bzw. Gasdrücken in Verbindung mit pneumatischen Förderungsanlagen sind als veränderliche ortsfeste Einwirkungen anzusehen.
- (6) Lasten infolge von Staubexplosionen sind als außergewöhnliche Einwirkungen im Sinne DIN 1055-100 einzustufen.

4.4 Einstufung der Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter

Lasten auf Flüssigkeitsbehälter infolge deren Befüllung sind als veränderliche ortsfeste Einwirkungen nach DIN 1055-100 einzustufen.

4.5 Anforderungsklassen

- (1) In Abhängigkeit von der Konstruktion des Silobauwerkes und seiner Anfälligkeit für unterschiedliche Versagensarten können bei der Ermittlung der Einwirkungen auf Silostrukturen verschiedene Genauigkeitsniveaus verwendet werden.
- (2) Die Siloeinwirkungen sollte nach einer der folgenden drei, in dieser Norm verwendeten Anforderungsklassen ermittelt werden (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 — Klassifikation von Bemessungssituationen

Anforderungsklasse	Beschreibung
Anforderungsklasse 3	Silos mit einem Fassungsvermögen von mehr als 10 000 Tonnen Silos mit einem Fassungsvermögen von mehr als 1 000 Tonnen, bei denen eine der folgenden Bemessungssituationen vorliegt: a) exzentrische Entleerung mit $e_C/d_C > 0,25$ (siehe Bild 1b) b) niedrige Silos mit einer exzentrischen Befüllung von mehr als $e_C/d_C > 0,25$
Anforderungsklasse 2	Alle Silos, die durch diese Lastnorm abgedeckt sind und nicht in den anderen beiden Klassen enthalten sind.
Anforderungsklasse 1	Silos mit einem Fassungsvermögen von weniger als 100 Tonnen

ANMERKUNG Die in Tabelle 1 angeführte Unterscheidung in unterschiedliche Anforderungsklassen ist unter Berücksichtigung der Unsicherheiten einer genauen Bestimmung der Einwirkungen festgelegt worden. Die Regelungen für kleine Silos sind einfach und konservativ auf der sicheren Seite, weil sie eine ihnen eigene Robustheit besitzen und die hohen Kosten z. B. für eine Bestimmung von Schüttgutkennwerten nicht gerechtfertigt sind.

(3) Es kann für ein Silo immer eine höhere Anforderungsklasse als nach Tabelle 1 gefordert ausgewählt werden. Für jeden Teil der in dieser Lastnorm beschriebenen Vorgehensweise (Lastansätze) kann, wenn dies zweckdienlich ist, eine höhere Anforderungsklasse als nach Tabelle 1 zugrunde gelegt werden.

(4) Sind mehrere Silozellen miteinander verbunden, sollte für jede Zelle die geeignete Anforderungsklasse einzeln bestimmt werden, nicht für die gesamte Silobatterie.

DIN 1055-6:2005-03**5 Bemessungssituationen****5.1 Allgemeines**

(1) Die Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter sind für jede relevante Bemessungssituation in Übereinstimmung mit den allgemeinen Festlegungen in DIN 1055-100 zu bestimmen.

(2) Es sind die maßgebenden Bemessungssituationen zu betrachten und die kritischen Lastfälle zu ermitteln. Für jeden kritischen Lastfall sind die Bemessungswerte der Auswirkungen aus der Kombination der Einwirkungen zu bestimmen.

(3) Die Kombinationsregeln hängen vom jeweiligen Nachweis ab und sind nach DIN 1055-100 zu wählen.

ANMERKUNG Maßgebende Kombinationsregeln sind in Anhang A angegeben.

(4) Einwirkungen, die von angrenzenden Gebäudestrukturen übertragen werden, sind zu berücksichtigen.

(5) Einwirkungen aus Förder- und Einfüllanlagen sind zu berücksichtigen. Besondere Aufmerksamkeit ist bei nicht fest installierten Förderanlagen geboten. Sie können über das eingelagerte Schüttgut Lasten auf die Silostruktur übertragen.

(6) Je nach Situation sind die folgenden außergewöhnlichen Einwirkungen und Situationen zu berücksichtigen:

- Einwirkungen infolge von Explosionen;
- Einwirkungen infolge von Fahrzeuganprall;
- Einwirkungen infolge von Erdbeben;
- Einwirkungen infolge von Brandbelastungen.

5.2 Bemessungssituationen infolge von in Silos gelagerte „Schüttgüter“

(1) Lasten auf Silos infolge der gelagerten Schüttgüter sind für den größtmöglichen Füllstand zu bestimmen.

(2) Die Lastansätze für das Befüllen und Entleeren können sowohl für die Tragsicherheitsnachweise als auch die Gebrauchstauglichkeitsnachweise verwendet werden.

(3) Die Bemessung für das Befüllen und Entleeren von Schüttgütern hat sich nach den Hauptlastfällen zu richten, die zu unterschiedlichen Grenzzuständen für das Bauwerk führen können:

- maximale Lasten senkrecht auf die vertikale Silowand (Horizontallasten);
- maximale vertikale Wandreibungslast auf die vertikale Silowand;
- maximale Vertikallasten auf den Siloboden;
- maximale Lasten auf den Silotrichter.

(4) Bei der Ermittlung der Lasten sind immer die oberen charakteristischen Werte der Schüttgutwichte γ zu verwenden.

(5) Die Ermittlung der Lasten eines Lastfalles hat immer für eine bestimmte Kombination von zusammengehörigen Schüttgutkennwerten μ , K und φ_i zu erfolgen, so dass jedem Grenzzustand eine spezielle, definierte Beschaffenheit eines Schüttgutes zugeordnet ist.

(6) Für jeden dieser Lastfälle werden seine Extremwerte erreicht, wenn die Schüttgutkennwerte μ , K und φ_i jeweils unterschiedliche Extremwerte innerhalb der Streubreiten ihrer charakteristischen Schüttgutkennwerte annehmen. Um bei der Bemessung eine ausreichende Sicherheit für alle Grenzzustände sicherzustellen, sind unterschiedliche Kombinationen der Extremwerte dieser Materialparameter zu betrachten. Die zu verwendenden Extremwerte der Schüttgutkennwerte sind für jeden der zu untersuchenden Lastfälle in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2 — Maßgebliche Kennwerte für die unterschiedlichen Lastansätze

Lastfalluntersuchung	Anzusetzender charakteristischer Wert		
	Wandreibungs- koeffizient μ	Horizontallast- verhältnis K	Winkel der inneren Reibung φ_i
Vertikaler Wandabschnitt			
Maximale Horizontallasten senkrecht auf die vertikalen Wände	Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert	Unterer Grenzwert
Maximale Wandreibungslasten auf die vertikalen Wände	Oberer Grenzwert	Oberer Grenzwert	Unterer Grenzwert
Maximale Vertikallasten auf den Trichter oder den Siloboden	Unterer Grenzwert	Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert
Lastfalluntersuchung	Wandreibungs- koeffizient μ	Lastverhältnis im Trichter F	Winkel der inneren Reibung φ_i
Trichterwände			
Maximale Trichterlasten im Füllzustand	Unterer Grenzwert für den Trichter	Unterer Grenzwert	Unterer Grenzwert
Maximale Trichterlasten beim Entleeren	Unterer Grenzwert für den Trichter	Oberer Grenzwert	Oberer Grenzwert
<p>ANMERKUNG 1 Es ist zu beachten, dass der Wandreibungswinkel immer kleiner oder gleich dem Winkel der inneren Reibung des gelagerten Schüttgutes ist (d. h. $\varphi_{wh} \leq \varphi_i$). Ansonsten bildet sich innerhalb des Schüttgutes eine Gleitfläche aus, wenn an der Wandkontaktfläche größere Schubspannungen aufnehmbar sind als durch die innere Reibung des Schüttgutes selbst. Das bedeutet, dass in allen Fällen der Wandreibungskoeffizient nicht größer als $\tan \varphi_i$ angenommen werden sollte ($\mu = \tan \varphi_w \leq \tan \varphi_i$).</p> <p>ANMERKUNG 2 Die Lasten senkrecht auf die Trichterwände p_n sind in der Regel am größten, wenn die Wandreibung im Trichter klein ist, weil dadurch ein kleinerer Teil der Lasten im Trichter über Reibung an der Wand abgetragen wird. Es ist zu beachten, welche maximalen Kennwerte bei den einzelnen Bemessungsaufgaben maßgeblich werden (d. h. ob die Wandreibungslasten oder Lasten senkrecht zur Trichterwand als maximal anzusetzen sind, hängt von dem zu untersuchenden Versagenszustand des Bauteils ab).</p>			

(7) Ungeachtet der obigen Ausführungen können Silos der Anforderungsklasse 1 mit den Mittelwerten der Schüttgutkennwerte, also des Mittelwerts des Wandreibungskoeffizienten μ_m , des Mittelwerts des Horizontallastverhältnisses K_m und des Mittelwerts des Winkels der inneren Reibung φ_{im} bemessen werden.

(8) Die grundlegenden Gleichungen zur Berechnung der Silolasten sind in den Abschnitten 7 und 8 enthalten. Sie sind der Berechnung folgender charakteristischen Lasten zugrunde zu legen:

— Fülllasten auf vertikale Wandabschnitte (siehe Abschnitt 7);

DIN 1055-6:2005-03

- Entleerungslasten auf vertikale Wandabschnitte (siehe Abschnitt 7);
- Füll- und Entleerungslasten auf waagerechte Böden (siehe Abschnitt 8);
- Fülllasten auf Trichter (siehe Abschnitt 8);
- Entleerungslasten auf Trichter (siehe Abschnitt 8).

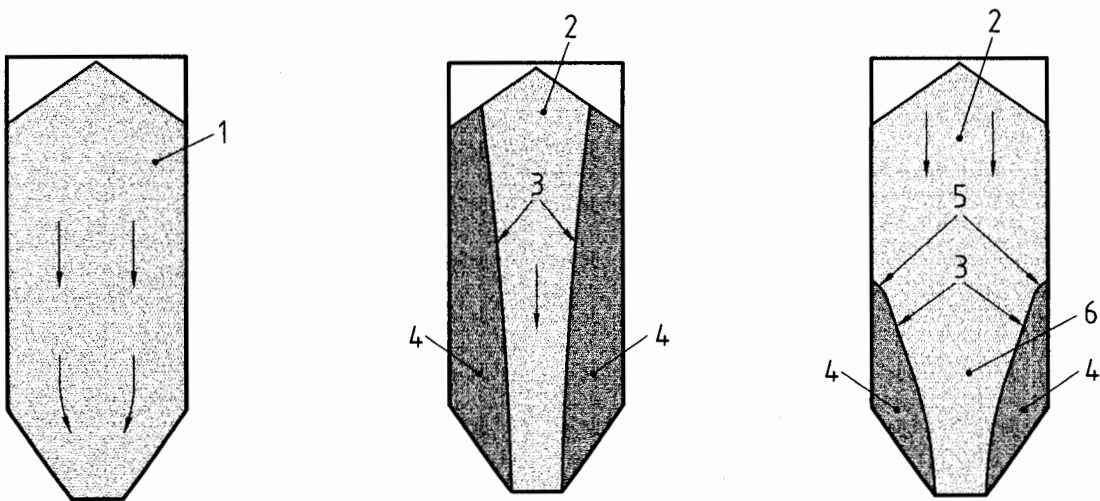
5.3 Bemessungssituationen infolge unterschiedlicher geometrischer Ausbildungen der Silogeometrie

(1) Unterschiedliche Siloschlankheiten (Verhältnis von Höhe zu Durchmesser), Trichtergeometrien und Anordnungen der Auslauföffnungen führen zu unterschiedlich zu betrachtenden Bemessungssituationen.

(2) Wenn bei einigen Füllständen die Flugbahn des Füllstrahles des eingefüllten Schüttgutes zu einem exzentrisch ausgebildeten Anschüttkegel an der Schüttgutoberfläche führt (siehe Bild 1b), können in unterschiedlichen Bereichen des Silos unterschiedliche Lagerungsdichten auftreten, die zu unsymmetrischen Lasten führen. Bei der Ermittlung der Größe dieser Lasten ist die größtmögliche Exzentrizität des Füllstrahles e_f zugrunde zu legen (siehe 7.2.1.2 und 7.3.1.2).

(3) Bei der Bemessung sind die Auswirkungen der sich beim Entleeren einstellenden Fließprofile zu beachten, die in folgende Kategorien eingeteilt werden können (siehe Bild 2):

- Massenfluss;
- Schlotfluss;
- gemischtes Fließen.



a) Massenfluss

b) Kernfluss (Schlotfluss)

c) Kernfluss (gemischtes Fließen)

Legende

- | | | | |
|---|--------------------------------|---|---------------------|
| 1 | Gesamtes Schüttgut in Bewegung | 4 | Schüttgut in Ruhe |
| 2 | Fließen | 5 | Effektiver Übergang |
| 3 | Fließkanalgrenzen | 6 | Effektiver Trichter |

Bild 2 — Grundlegende Fließprofile

(4) Wenn bei Schlotfluss zusätzlich sichergestellt werden kann, dass sich der Fließkanal immer innerhalb des Schüttgutes ohne Berührung mit der Silowand befindet (siehe Bilder 3a und 3b), können die Entleerungsdrücke vernachlässigt werden. Niedrige Silos mit konzentrischer Entleerung mit Hilfe der Schwerkraft und Silos mit einem an der Schüttgutoberfläche befindlichen mechanischen Entleerungssystem, das eine Schlotflussausbildung innerhalb des Schüttgutkörpers sicherstellt (siehe Bild 5a und 5b und 6a), erfüllen diese Bedingungen (siehe 7.1 (9) und 7.3.2.1 (2) und (4)).

ANMERKUNG Ein geeignet ausgelegtes Zentralrohr mit seitlichen Entnahmeöffnungen („Anti-Dynamic Tube“) kann diese Bedingung, d. h. die Ausbildung eines inneren Schlotflusses, auch sicherstellen.

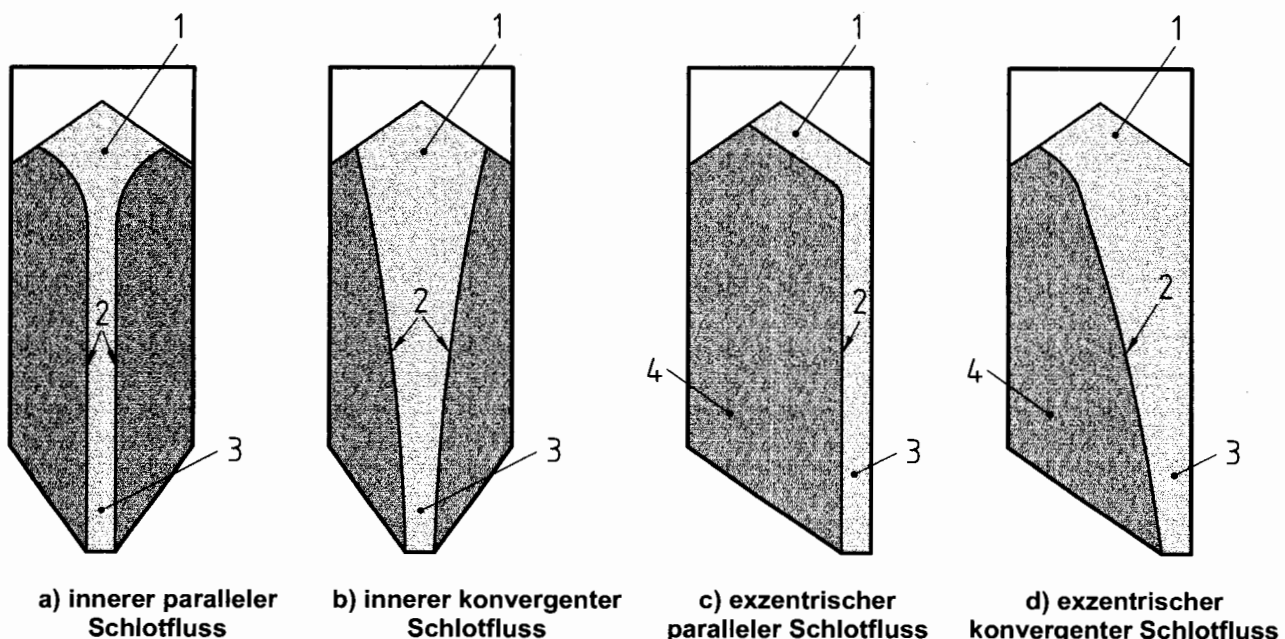
(5) Bei symmetrischem Massenfluss oder bei gemischtem Fließen (siehe Bild 2) sind bei der Bemessung in diesen Fällen üblicherweise auftretenden unsymmetrischen Lasten zu berücksichtigen (siehe 7.2.2.2 und 7.3.2.2).

(6) Bei Fließprofilen mit Kernfluss (siehe Bild 2) und teilweisem Kontakt der sich in Bewegung befindlichen Schüttgutbereiche mit der Silowand sind bei der Bemessung weitere unsymmetrische Lastanteile zu berücksichtigen, die speziell in diesem Fall auftreten können (siehe Bild 3c und 3d sowie Bild 4b und 4c) (siehe 7.2.4).

(7) Bei Silos mit mehreren Auslauföffnungen ist unter Annahme des maximal möglichen Füllzustandes zu berücksichtigen, dass im Betrieb entweder eine Auslauföffnung allein oder Kombinationen von gleichzeitig geöffneten Auslauföffnungen wirksam sein können.

(8) Bei Silos mit mehreren Auslauföffnungen sind die im Betrieb vorgesehenen Kombinationen von aktiven Auslauföffnungen als gewöhnliche Bemessungssituationen zu behandeln. Andere nicht auszuschließende Öffnungssituationen, die der planmäßige Betrieb nicht vorsieht, sind als außergewöhnliche Bemessungssituationen zu behandeln.

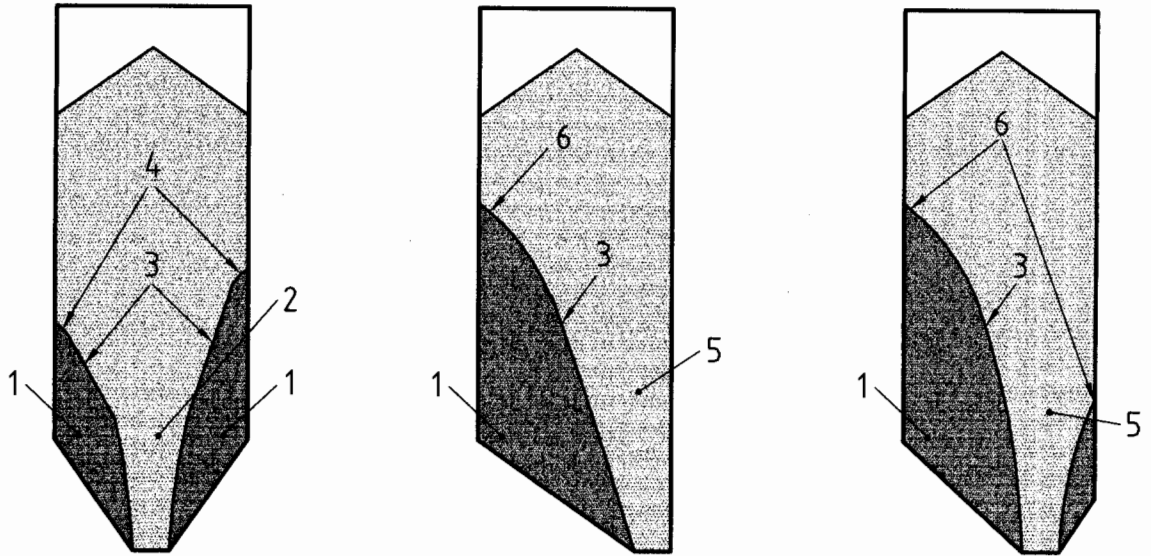
(9) Wenn bei einem exzentrisch gefüllten, sehr schlanken Silo (d. h. $h/d_c > 4$) Entmischungseffekte in unterschiedlichen Bereichen im Silo entweder zu unterschiedlichen Packungsdichten oder Kohäsion des Schüttgutes führen, kann die asymmetrische Anlagerung der Schüttgutpartikel einen unsymmetrischen Kernfluss auslösen (siehe Bild 5d). Dies führt im Silo zu Bereichen, in denen das Schüttgut entlang der Silowand fließt und dabei unsymmetrische Lasten hervorruft. Für diese Fälle sind spezielle Lastansätze (siehe 7.2.4.1 (2)) zu verwenden.



Legende

- | | |
|---------------------|---------------------|
| 1 Fließen | 3 Fließender Schlot |
| 2 Fließkanalgrenzen | 4 Schüttgut in Ruhe |

Bild 3 — Fließprofile mit Schlotfluss



a) konzentrisches gemischtes Fließen

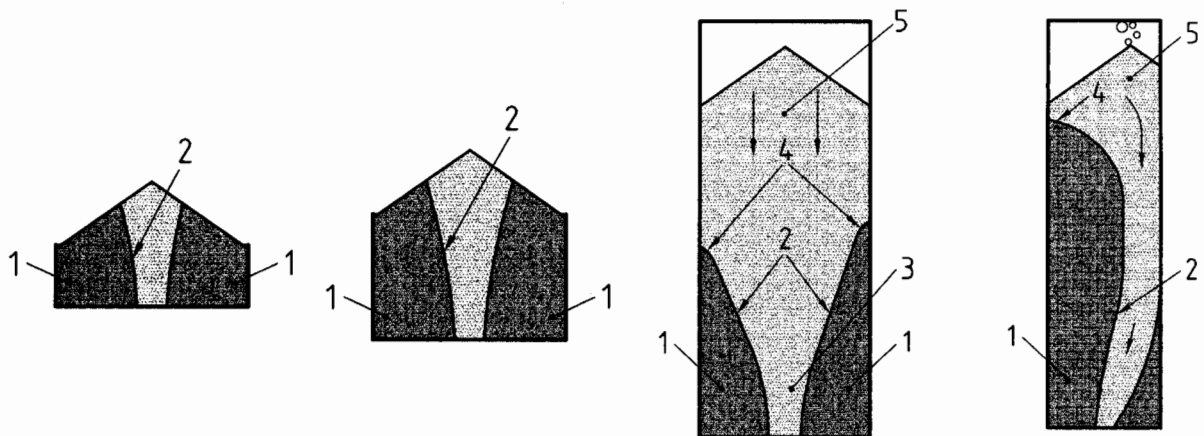
b) voll exzentrisches gemischtes Fließen

c) teilweise exzentrisches gemischtes Fließen

Legende

- | | |
|-----------------------|---|
| 1 Ruhend | 4 Effektiver Übergang |
| 2 Effektiver Trichter | 5 Fließzone |
| 3 Fließkanalgrenze | 6 Effektiver Übergang variiert in Siloumfangsrichtung |

Bild 4 — Fließprofile mit gemischtem Schüttgutfließen



a) Stützwandsilo

b) niedriger Silo

c) schlanker Silo

d) sehr schlanker Silo

Legende

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1 Schüttgut in Ruhe | 4 Effektiver Übergang |
| 2 Fließkanalgrenze | 5 Fließen |
| 3 Effektiver Trichter | |

Bild 5 — Auswirkung der Schlankheit (Verhältnis Höhe zu Durchmesser) auf das gemischte Schüttgutfließen und den Schlotfluss

(10) Bei Silos mit pneumatisch beförderten staubförmigen Schüttgütern sind zwei Bemessungssituationen bei jeweils maximaler Befüllung zu betrachten:

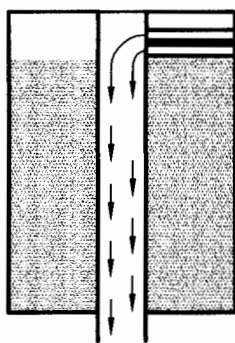
- Das eingefüllte Schüttgut kann einen Schüttkegel ausbilden, wie dies bei den anderen Schüttgütern der Fall ist.
- Es ist zu berücksichtigen, dass sich die Schüttgutoberfläche unabhängig vom Böschungswinkel und der Einfüllzentrizität unter Umständen auch eben ausformt (siehe Bild 6c). In diesem Fall können die Exzentrizitäten e_f und e_t zu null angesetzt werden.

(11) Bei Silos zur Lagerung von staubförmigen Schüttgütern mit kontinuierlicher Lufteinblasung im Bodenbereich als Entleerungshilfe (siehe Bild 6b) kann der gesamte Schüttgutbereich in Bodennähe fluidisiert werden, was sogar in einem niedrigen Silo einen wirksamen Massenfluss hervorrufen kann. Solche Silos sind unabhängig von der tatsächlichen Schlankheit h_c/d_c entsprechend dem Vorgehen bei schlanken Silos zu berechnen.

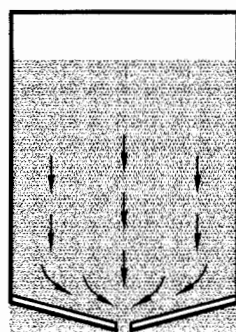
(12) Bei Silos für staubförmige Schüttgüter mit kontinuierlicher Lufteinblasung im Bodenbereich als Entleerungshilfe (siehe Bild 6b) kann auch nur ein Teilbereich des Schüttgutes in Bodennähe fluidisiert werden. Dies kann einen exzentrischen Schlotfluss hervorrufen (siehe Bild 4b), was bei der Bemessung zu berücksichtigen ist. Die Exzentrizität des resultierenden Fließkanals und der resultierende Wert für die anzusetzende Exzentrizität e_o sind unter Beachtung des fluidisierten Bereiches und nicht nur aus der Lage der Auslauföffnung abzuleiten.

(13) Die vertikalen Silowände mit einem Entleerungstrichter, der zu einem „erweiterten Fließen“ („expanded flow“) (siehe Bild 6d) führt, können den Bedingungen eines gemischten Schüttgutfließens unterliegen. Dies kann zu unsymmetrischen Entleerungslasten führen. Als Schlankheit ist bei diesem Silotyp das Verhältnis h_b/d_c anstatt h_c/d_c (siehe Bild 1a) anzusetzen.

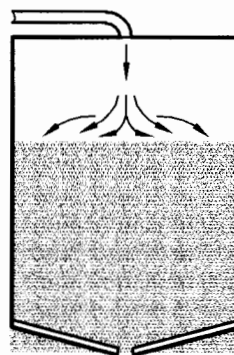
(14) Ein Silo mit einer Schlankheit h_c/d_c kleiner als 0,4 und mit einem Auslauftrichter ist als niedriger Silo einzustufen. Bei einem waagerechten Siloboden ist dieser Silo als Stützwandsilo einzustufen.



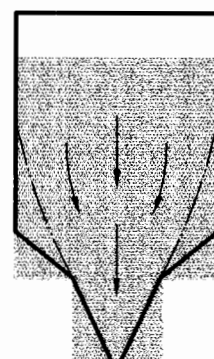
a) Mechanisch unterstütztes Entleeren z. B. mit einem rotierenden Räumarm mit konzentrischen Lasten



b) Lufteinblasen und Luftschlitze erzeugen Massenfluss



c) Pneumatisches Befüllen von staubförmigen Schüttgütern bewirkt meistens eine ebene Schüttgutoberfläche



d) „expanded flow“ Trichter führen lediglich im unteren Trichter zu Massenfluss

Bild 6 — Spezielle Füll- und Entleerungsanordnungen

DIN 1055-6:2005-03**5.4 Bemessungssituationen infolge spezieller Konstruktionsformen von Silos**

(1) Bei der Bemessung von Stahlbetonsilos für den Gebrauchszustand sind die Rissbreiten auf ein geeignetes Maß zu beschränken. Die Kontrolle der Rissbreite hat die Nachweise zur Rissbreitenbeschränkung nach DIN 1045-1 unter Berücksichtigung der sich aus den Umgebungsbedingungen des Silos ergebenden Expositionsklassen zu erfüllen.

(2) Bei Metallsilos, die maßgeblich aus Konstruktionen mit Bolzen- und Schraubenverbindungen bestehen, sind die Festlegungen für die unsymmetrischen Lastansätze (Teilflächenlast) nach 7.2.1.4 (4) zu treffen.

(3) Bei Metallsilos mit rechteckigem Querschnitt, die innerhalb des Siloschaftes Zugbänder zur Reduzierung der Wandbiegemomente enthalten, sind die Ausführungen von 7.7 zu beachten.

(4) Die Auswirkungen von Ermüdungseffekten sind bei Silos und Flüssigkeitsbehältern zu berücksichtigen, wenn diese durchschnittlich mehr als einmal am Tag mit einem Lastzyklus beaufschlagt werden. Ein Lastzyklus entspricht einer vollständigen Befüllung und Entleerung eines Silos, oder im Falle eines mit Lufteinblasen beaufschlagten Silos (siehe Bild 6b) eine vollständige Abarbeitung (Rotation) der mit Lufteinblasen beaufschlagten Sektoren. Ermüdungseffekte sind auch bei Silos zu berücksichtigen, die von schwingenden Maschinen/Anlagenkomponenten beeinflusst werden.

(5) Vorgefertigte Silos sind auch für Einwirkungen bei der Herstellung, beim Transport und bei der Montage zu bemessen.

(6) Bei Schlupf- und Einstiegsöffnungen in den Silo- oder Trichterwänden sind die Lasten auf die Verschlussdeckel mit dem doppelten Wert der auf die angrenzenden Wandabschnitte anzusetzenden maximalen Lasten zu berücksichtigen. Diese Lasten sind nur für die Bemessung des Verschlussdeckels und seine Auflagerung bzw. Befestigungskonstruktionen anzusetzen.

(7) Wenn das Silodach Lasten von Staubfilteranlagen, Zyklonen, mechanischen Fördereinrichtungen oder sonstigen Anlagenteilen aufzunehmen hat, sind diese Lasten als Nutzlasten zu behandeln.

(8) Wenn pneumatische Fördersysteme zur Befüllung oder Entleerung von Silos verwendet werden, sind entsprechende resultierende Luftdruckunterschiede zu berücksichtigen.

ANMERKUNG Diese Drücke betragen zwar im Regelfall < 10 kPa, es können aber auch erhebliche Unterdrücke (i. Allg. 40 kPa $\approx 0,4$ bar) zufolge einer fehlerhaften Dimensionierung von speziellen Förderanlagen oder bei Betriebsstörungen auftreten. Silos müssen deshalb mit geeigneten Entlastungsvorrichtungen für unvorhergesehene Ereignisse ausgestattet sein, wenn der Konstrukteur des Silos diese nicht anderweitig sicher ausgeschlossen werden kann.

(9) Beim Einsatz von schwingenden Einrichtungen, Luftkanonen oder rotierenden Entnahmearmen am Siloboden sind die dadurch bedingten Laständerungen in Hinblick auf den Grenzzustand der Ermüdung zu untersuchen. Schwingungen aus pneumatischen Förderanlagen sind ebenfalls zu berücksichtigen.

(10) Bei einem Umbau eines bestehenden Silos durch Einsetzen einer Auskleidung der Silowände sind die Folgen einer veränderten Wandreibung auf die Silobemessung zu betrachten, einschließlich der möglichen Auswirkungen aus einem sich möglicherweise veränderten Fließprofils.

5.5 Bemessungssituationen infolge in Flüssigkeitsbehältern gelagerten Flüssigkeiten

Lasten auf Flüssigkeitsbehälter infolge der gelagerten Flüssigkeiten sind für den maximalen Füllzustand zu ermitteln.

5.6 Bemessungsprinzipien für Explosionen

(1) Da in Flüssigkeitsbehältern und Silos gelagerte Flüssigkeiten bzw. Schüttgüter zu Explosionen neigen können, sind die potenziellen Schädigungen durch folgende Maßnahmen zu begrenzen oder zu vermeiden:

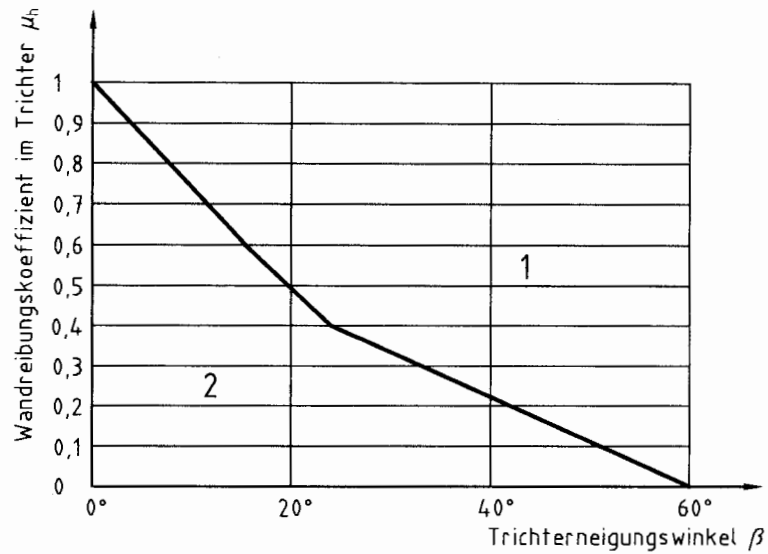
- Anordnung von ausreichenden Druckentlastungsflächen;
 - Anordnung von geeigneten Explosionsunterdrückungssystemen;
 - Auslegung/Bemessung der Struktur für die Aufnahme der Explosionsdrücke.
- (2) Einige Schüttgüter, die zu Staubexplosionen neigen, sind in Anhang I genannt.
- (3) Die Hinweise zum Lastfall Staubexplosion nach Anhang I sind zu beachten. Weitere Hinweise einschließlich Regeln für die Bemessung für Staubexplosionen können dem DIN-Fachbericht 140 entnommen werden.
- (4) Einwirkungen infolge einer Staubexplosion in einer Siloanlage auf benachbarte Gebäude oder Gebäudeteile sind zu berücksichtigen.

6 Schüttgutkennwerte

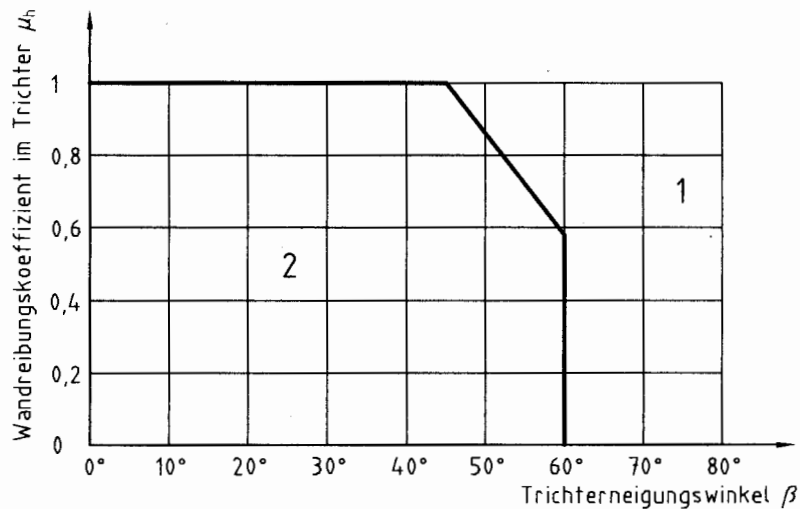
6.1 Allgemeines

- (1) Bei der Ermittlung der Silolasten sind folgende Einflüsse zu berücksichtigen:
- die Streuung der Schüttgutkennwerte;
 - die Schwankungen der Wandreibung an der Silowand;
 - die Silogeometrie;
 - die Befüll- und Entleerungsverfahren.
- (2) Günstig wirkende Einflüsse der Schüttgutsteifigkeit dürfen bei der Lastermittlung und den Stabilitätsbetrachtungen der Wand nicht berücksichtigt werden. Eine positive Wirkung einer Wandverformung auf die sich im Schüttgut entwickelnden Drücke darf nicht in Ansatz gebracht werden, außer wenn eine verständlich verifizierte Berechnungsmethode nachgewiesen werden kann.
- (3) Falls erforderlich, ist die Art des Fließprofils (Massen- oder Kernfluss) aus Bild 7 zu ermitteln. Bild 7 darf aufgrund der zugrunde gelegten vereinfachenden Annahmen aber nicht für die verfahrenstechnische Auslegung der Silos herangezogen werden, da z. B. der Einfluss der inneren Reibung vernachlässigt ist.

ANMERKUNG Die Auslegung der Silogeometrie für einen Massenfluss ist außerhalb des Anwendungsbereiches dieser Norm. Für diese Zwecke sind die speziellen Methoden und Verfahren der schüttgutmechanischen Verfahrenstechnik anzuwenden.



a) Konischer Trichter



b) Keilförmiger Trichter

Legende

- 1 Bereich mit Kernfluss
- 2 Bereich mit der Möglichkeit von Massenfluss

Bild 7 — Bedingungen, unter denen Drücke infolge Massenfluss auftreten**6.2 Schüttgutkennwerte****6.2.1 Allgemeines**

(1) Die für die Berechnung der Lasten zu quantifizierenden Materialeigenschaften von in Silozellen gespeicherten Schüttgütern sind entweder aus Versuchsergebnissen oder aus anderem geeigneten Datenmaterial zu beschaffen bzw. abzuleiten.

(2) Bei Verwendung von Werten aus Versuchsergebnissen und anderen Datenquellen sind diese in Hinblick auf den jeweilig betrachteten Lastfall in geeigneter Weise auszuwerten.

(3) Es ist zu berücksichtigen, dass zwischen den in Versuchen gemessenen Materialparametern und den Kennwerten, die das tatsächliche Schüttgutverhalten im Silo bestimmen, signifikante Unterschiede bestehen können.

(4) Bei der Abschätzung der unter (3) erwähnten Unterschiede in den Schüttgutkennwerten sind unter anderem folgende Faktoren zu beachten:

- viele Parameter sind keine Konstanten, sondern können die vom Spannungsniveau und der Belastungsgeschichte abhängig sein;
- Einflüsse infolge Partikelform, Größe und Korngrößenverteilung können sich im Versuch und im Silo unterschiedlich stark auswirken;
- Zeiteinflüsse;
- Schwankungen des Feuchtigkeitsgehalts;
- Einflüsse von dynamischen Einwirkungen;
- die Sprödigkeit oder Duktilität der getesteten Schüttgüter;
- die Art und Weise des Einbringens des Schüttgutes in den Silo und in das Prüfgerät.

(5) Bei der Abschätzung der unter (3) erwähnten Unterschiede in Bezug auf den Wandreibungskoeffizienten sind folgende Faktoren zu beachten:

- Korrosion und chemische Reaktion zwischen den Schüttgutpartikeln, Feuchte und der Wand;
- Abrieb und Verschleiß, die die Silowand aufrauen oder glätten können;
- Polieren der Wandoberfläche;
- Anreicherung von Fettablagerungen an der Wand;
- Partikel, die in die Wandoberfläche hineingedrückt werden (gewöhnlich ein Einfluss, der zur Aufrauung der Wandoberfläche führt).

(6) Bei der Festlegung der Werte der Materialparameter ist Folgendes zu beachten:

- veröffentlichte und allgemein anerkannte Erkenntnisse zu der Anwendung der jeweiligen Versuche;
- Vergleichsbetrachtungen zu den in Versuchen gemessenen Werten der einzelnen Parameter mit entsprechend veröffentlichten Kennwerten und unter Berücksichtigung von allgemeinen Erfahrungswerten;
- die Streuung der für die Bemessung relevanten Parameter;
- die Ergebnisse aus großmaßstäblichen Messungen an Silos ähnlicher Bauweise;
- Korrelationen zwischen den Ergebnissen von unterschiedlichen Arten von Versuchen;
- während der Nutzungsdauer des Silos erkennbare Veränderungen in den Materialkennwerten.

(7) Die Auswahl der charakteristischen Materialkennwerte hat auf der Grundlage von in Laboruntersuchungen bestimmten Werten unter Berücksichtigung von gründlich erworbenem Erfahrungswissen zu erfolgen.

(8) Der charakteristische Wert eines Materialparameters ist als eine sorgfältige Abschätzung des Wertes zu wählen, der das Auftreten der Last beeinflusst.

Tabelle 3 — Kategorien der Wandoberflächen

Kategorie	Wandoberfläche Erläuterung	Beispielhafte Materialien
D1	Poliert	Kaltgewalzter nichtrostender Stahl Narbiger nichtrostender Stahl Polierter nichtrostender Stahl Galvanisierter Kohlenstoffstahl Aluminium Stranggepresstes hochverdichtetes Polyethylen
D2	Glatt	Karbonstahl mit leichtem Oberflächenrost Beschichteter Kohlenstoffstahl Gegossenes hochverdichtetes Polyethylen Glatte keramische Platten Mit Stahlschalung hergestellte Betonoberfläche
D3	Rau	Schalungsrauer Beton Narbiger Kohlenstoffstahl Stahlsilos mit Bolzen auf der innen liegenden Wandoberfläche Grob polierte keramische Platten
D4	Gewellt	Horizontal gewellte Wände Profilierte Bleche mit horizontalen Schlitzern Nicht genormte Wände mit großen Abweichungen
Bei diesen Oberflächen ist mit besonderer Sorgfalt der Effekt der Aufrauung durch in die Wandoberfläche eingedrückte Partikel zu betrachten.		

ANMERKUNG Die in Tabelle 3 angeführte Klassifizierung und Erläuterungen beziehen sich auf die Reibung und weniger auf die Rauheit. Der maßgebliche Grund hierfür ist, dass nur eine geringe Korrelation zwischen dem Maß der Rauheit und der gemessenen Wandreibung infolge eines entlang der Wandoberfläche gleitenden Schüttgutes besteht.

6.2.2 Ermittlung der Schüttgutkennwerte

- (1) Die für die Bemessung anzunehmenden Schüttgutkennwerte haben mögliche Streuungen infolge der Änderungen in der Zusammensetzung, Produktionsverfahren, Korngrößenverteilung, Feuchtigkeitsgehalt, Temperatur, Alter und elektrischer Aufladung während der Handhabung zu berücksichtigen.
- (2) Die Schüttgutkennwerte sind entweder nach der vereinfachten Vorgehensweise nach 6.2.3 oder durch Messungen in Versuchen nach 6.3 zu bestimmen.
- (3) Kennwerte von Schüttgütern, die nicht in der Tabelle E.1 enthalten sind, sind über Messungen in Versuchen nach 6.3 zu beschaffen.
- (4) Die der Bemessung zugrunde gelegten Wandreibungsbeiwerte μ von Schüttgütern sollten die Rauheit der Wandoberflächen, an welchen sie entlang gleiten, berücksichtigen. In Tabelle 3 sind unterschiedliche Klassen von Wandoberflächen definiert, wie sie in dieser Norm verwendet werden.
- (5) Bei Silos mit Wandoberflächen der Klasse (Kategorie) D4 nach Tabelle 3 sollte der effektive Wandreibungskoeffizient nach dem in D.2 beschriebenen Vorgehen bestimmt werden.
- (6) Der Schüttgutbeiwert C_{op} für die Teilflächenlasten ist Tabelle E.1 zu entnehmen oder nach Gleichung (8) zu berechnen.

6.2.3 Vereinfachte Vorgehensweise

(1) Die Kennwerte von allgemein bekannten Schüttgütern sind der Tabelle E.1 zu entnehmen. Die dort angegebenen Werte für die Wichte γ entsprechen dem oberen charakteristischen Wert, die Kennwerte für die Wandreibung μ_m , für das Horizontallastverhältnis K_m und für den Winkel der inneren Reibung φ_{im} stellen Mittelwerte dieser Kenngrößen dar.

(2) Können einzelne Schüttgüter nicht eindeutig den in Tabelle E.1 aufgelisteten Schüttgütern zugeordnet werden, sind deren Kennwerte nach den in 6.3 beschriebenen Verfahren experimentell zu bestimmen.

(3) Zur Ermittlung der charakteristischen Kennwerte von μ , K und φ_i sind die aufgelisteten Werte von μ_m , K_m und φ_{im} mit so genannten Konversions- oder Umrechnungsfaktoren zu multiplizieren bzw. dividieren. Die Umrechnungsfaktoren a_x sind in der Tabelle E.1 für die dort aufgeführten Schüttgüter angegeben. Bei der Berechnung der maximalen Lasten sind die folgenden Kombinationen zu verwenden:

$$\text{oberer charakteristischer Wert von } K = a_K K_m \quad (1)$$

$$\text{unterer charakteristischer Wert von } K = K_m / a_K \quad (2)$$

$$\text{oberer charakteristischer Wert von } \mu = a_\mu \mu_m \quad (3)$$

$$\text{unterer charakteristischer Wert von } \mu = \mu_m / a_\mu \quad (4)$$

$$\text{oberer charakteristischer Wert von } \varphi_i = a_\varphi \varphi_{im} \quad (5)$$

$$\text{unterer charakteristischer Wert von } \varphi_i = \varphi_{im} / a_\varphi \quad (6)$$

(4) Bei der Ermittlung der Einwirkungen auf Silos der Anforderungsklasse 1 können anstatt der oberen und unteren charakteristischen Werte die Mittelwerte μ_m , K_m und φ_{im} verwendet werden.

6.3 Messung der Schüttgutkennwerte in Versuchen

6.3.1 Experimentelle Ermittlung (Messverfahren)

(1) Die experimentelle Ermittlung der Kennwerte ist mit repräsentativen Schüttgutproben durchzuführen. Für jede Schüttguteigenschaft ist ein Mittelwert des betreffenden Kennwertes unter Berücksichtigung der Streuung ihrer maßgeblichen so genannten sekundären Einflussparameter wie Schüttgutzusammensetzung, Siebkurve, Feuchtigkeitsgehalt, Temperatur, Alter und die Möglichkeit einer elektrischen Aufladung während des Betriebs oder der Herstellung zu bestimmen.

(2) Die charakteristischen Werte werden aus den experimentell ermittelten Mittelwerten unter Zuhilfenahme der Gleichungen (1) bis (6) und den entsprechenden Umrechnungsfaktoren a_x abgeleitet.

(3) Jeder Umrechnungsfaktor a_x ist sorgfältig zu bestimmen. Dabei ist dem Umstand in geeigneter Weise Rechnung zu tragen, dass sich die Schüttgutkennwerte während der Nutzungsdauer des Silos verändern können. Ebenso sind die möglichen Auswirkungen von Entmischungserscheinungen im Silo und die Ungenauigkeiten bei der Aufbereitung der Materialproben zu berücksichtigen.

(4) Liegen ausreichend Versuchsdaten vor, um die Standardabweichung der Kennwerte zu bestimmen, sind die Umrechnungsfaktoren a_x nach C.11 zu ermitteln.

(5) Die Spanne zwischen dem Mittelwert und dem charakteristischen Wert der Schüttgutkennwerte drückt sich durch den Umrechnungsfaktor a_x aus. Wenn ein sekundärer Einflussparameter für sich allein für mehr als 75 % des Umrechnungsfaktors a_x verantwortlich ist, ist dieser um den Faktor 1,10 zu erhöhen.

ANMERKUNG Durch die oben angeführten Festlegung soll sichergestellt werden, dass die Werte von a_x eine angemessene Auftretenswahrscheinlichkeit der abgeleiteten Lasten repräsentieren.

DIN 1055-6:2005-03**6.3.2 Schüttgutwichte γ**

(1) Die Schüttgutwichte γ ist für eine Packungsdichte der Schüttgutpartikel und bei einem Druckniveau zu bestimmen, die der Packungsdichte bzw. dem Druckniveau im Bereich des maximalen vertikalen Fülldrucks p_{vft} im Silo entsprechen. Der Vertikaldruck p_{vft} kann aus den Gleichungen (11) oder (86) für die Schüttguttiefe am unteren Ende des Siloschaftes bestimmt werden.

(2) Zur Messung der Schüttgutwichte γ sollten die Prüfverfahren nach C.6 verwendet werden.

(3) Der Umrechnungsfaktor zur Ableitung des charakteristischen Wertes aus dem gemessenen Wert ist nach der in C.11 beschriebenen Vorgehensweise zu bestimmen. Der Umrechnungsfaktor a_γ darf nicht kleiner als $a_\gamma = 1,10$ angenommen werden, außer wenn ein kleinerer Wert durch Versuche und durch eine geeignete Abschätzung gesondert nachgewiesen werden kann (siehe C.11).

6.3.3 Wandreibungskoeffizient μ

(1) Die experimentelle Bestimmung des Wandreibungskoeffizienten μ für die Ermittlung der Lasten ist für eine Packungsdichte der Schüttgutpartikel und bei einem Druckniveau zu bestimmen, die der Packungsdichte bzw. dem Druckniveau im Bereich des maximalen horizontalen Fülldruckes p_{hfb} im Silo entsprechen. Das Druckniveau p_{hfb} kann aus den Gleichungen (9) oder (78) für die Schüttguttiefe am unteren Ende des Bereiches mit vertikalen Wänden bestimmt werden.

(2) Zur Messung des Wandreibungskoeffizienten μ sollten die Prüfverfahren nach C.7 verwendet werden.

(3) Der Mittelwert μ_m des Wandreibungskoeffizienten und seine Standardabweichung sind aus Versuchen zu bestimmen und abzuleiten. Wenn aus dem Datenmaterial nur ein Mittelwert ermittelt werden kann, ist die Standardabweichung nach dem in C.11 beschriebenen Vorgehen zu schätzen.

(4) Der Umrechnungsfaktor zur Ableitung des charakteristischen Wertes aus dem gemessenen Wert ist nach dem in C.11 beschriebenen Vorgehen zu bestimmen. Der Umrechnungsfaktor darf nicht kleiner als $a_\mu = 1,10$ angenommen werden, außer wenn ein kleinerer Wert durch Versuche und durch eine geeignete Abschätzung gesondert nachgewiesen werden kann (siehe C.11).

6.3.4 Winkel der inneren Reibung φ_i

(1) Der Winkel der inneren Reibung φ_i für die Berechnung der Lasten – als Arcustangens aus dem Verhältnis von Scherkraft und Normalkraft beim Bruch unter Erstbelastung – ist für eine Packungsdichte der Schüttgutpartikel und bei einem Druckniveau zu bestimmen, die der Packungsdichte und dem Druckniveau im Bereich des maximalen vertikalen Fülldruckes p_{vft} entsprechen. Das Druckniveau p_{vft} kann aus den Gleichungen (11) oder (86) für die Schüttguttiefe am unteren Ende des Bereiches mit vertikalen Wänden bestimmt werden.

(2) Zur Messung des Winkels der inneren Reibung φ_i sollten die Prüfverfahren nach C.9 verwendet werden.

(3) Der Mittelwert φ_{im} des Winkels der inneren Reibung und seine Standardabweichung δ sind aus Versuchen zu bestimmen und abzuleiten. Wenn aus dem Datenmaterial nur ein Mittelwert ermittelt werden kann, ist die Standardabweichung nach dem in C.11 beschriebenen Vorgehen abzuschätzen.

(4) Der Umrechnungsfaktor zur Ableitung des charakteristischen Wertes aus dem gemessenen Wert ist nach dem in C.11 beschriebenen Vorgehen zu bestimmen. Der Umrechnungsfaktor a_φ darf nicht kleiner als $a_\varphi = 1,10$ angenommen werden, außer wenn ein kleinerer Wert durch Versuche und durch die geeignete Abschätzung gesondert nachgewiesen werden kann (siehe C.11).

6.3.5 Horizontallastverhältnis K

(1) Das Horizontallastverhältnis K für die Ermittlung der Lasten (Verhältnis von mittlerem Horizontaldruck zu mittlerem Vertikaldruck) ist für eine Packungsdichte der Schüttgutpartikel und bei einem Druckniveau zu bestimmen, die der Packungsdichte und dem Druckniveau im Bereich des maximalen vertikalen Fülldruckes entsprechen. Das Druckniveau p_{vf} kann aus den Gleichungen (11) oder (86) für die Schüttguttiefe am unteren Ende des Bereiches mit vertikalen Wänden bestimmt werden.

(2) Zur Ermittlung des Horizontallastverhältnisses K sollten die Prüfverfahren nach C.8 verwendet werden.

(3) Der Mittelwert K_m des Horizontallastverhältnisses und seine Standardabweichung sind aus Versuchen zu bestimmen und abzuleiten. Wenn aus dem Datenmaterial nur ein Mittelwert ermittelt werden kann, ist die Standardabweichung nach dem in C.11 beschriebenen Vorgehen abzuschätzen.

(4) Ein Näherungswert für K_m kann alternativ auch aus dem Mittelwert des über Versuche ermittelten Winkels der inneren Reibung bei Erstbelastung φ_{im} (siehe 6.3.4) nach folgender Gleichung (7) ermittelt werden:

$$K_m = 1,1 (1 - \sin \varphi_{im}) \quad (7)$$

ANMERKUNG Der Faktor 1,1 in Gleichung (7) wird verwendet, um ein angemessenes Vorhaltemaß zur Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen einem unter nahezu keinen Wandreibungseinflüssen gemessenen Wert von K ($= K_0$) und einem unter Vorliegen von Wandreibungseinflüssen gemessenen Wert von K (siehe auch 6.2.2 (5)) sicherzustellen.

(5) Der Umrechnungsfaktor zur Ableitung des charakteristischen Wertes aus dem gemessenen Wert ist nach dem in C.11 beschriebenen Vorgehen zu bestimmen. Der Umrechnungsfaktor a_K darf nicht kleiner als $a_K = 1,10$ angenommen werden, außer wenn ein kleinerer Wert durch Versuche und durch eine geeignete Abschätzung gesondert nachgewiesen werden kann (siehe C.11).

6.3.6 Kohäsion c

(1) Die Kohäsion von Schüttgütern variiert mit der Konsolidierungsspannung, mit der die Probe beaufschlagt wurde. Sie ist für eine Packungsdichte der Schüttgutpartikel und bei einem Druckniveau zu bestimmen, die der Packungsdichte und dem Druckniveau im Bereich des maximalen vertikalen Fülldruckes p_{vf} entsprechen. Das Druckniveau p_{vf} kann aus den Gleichungen (11) oder (86) für die Schüttguttiefe am unteren Ende des Bereiches mit vertikalen Wänden bestimmt werden.

(2) Zur Messung der Kohäsion c sollten die Prüfverfahren nach C.9 verwendet werden.

ANMERKUNG Alternativ kann die Kohäsion c über Ergebnisse von Versuchen in der Scherzelle von Jenike ermittelt werden. Eine Methode zur Berechnung der Kohäsion aus den Versuchsergebnissen ist C.9 zu entnehmen.

6.3.7 Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast C_{op}

(1) Der Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast C_{op} ist auf der Grundlage von geeigneten Versuchsdaten zu ermitteln.

ANMERKUNG 1 Die Entleerungsfaktoren C berücksichtigen eine Reihe von Phänomenen, die beim Entleeren von Silos auftreten. Die symmetrische Zunahme der Drücke ist relativ unabhängig vom gelagerten Schüttgut, die unsymmetrischen Komponenten sind jedoch stark vom Material abhängig. Die Materialabhängigkeit der unsymmetrischen Komponente wird durch den Schüttgutbeiwert C_{op} repräsentiert. Dieser Parameter ist mit Hilfe von experimentellen Prüfverfahren an Schüttgütern nicht leicht zu bestimmen.

ANMERKUNG 2 Ein geeignetes experimentelles Prüfverfahren für den Parameter C_{op} ist bisher noch nicht entwickelt. Dieser Faktor basiert daher auf Auswertungen von Versuchen an Silos und auf Erfahrungswerten an Silos mit konventionellen Füll- und Entleerungssystemen, die innerhalb üblicher Baulöcher errichtet wurden.

DIN 1055-6:2005-03

(2) Werte für den Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast C_{op} für allgemein bekannte Schüttgüter sind Tabelle E.1 zu entnehmen.

(3) Für Schüttgüter, die nicht in Tabelle E.1 aufgeführt sind, kann der Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast aus den Streufaktoren für das Horizontallastverhältnis a_K und dem Wandreibungsbeiwert a_μ nach der Gleichung (8) abgeschätzt werden:

$$C_{op} = 3,5 a_\mu + 2,5 a_K - 6,2 \quad (8)$$

Dabei ist

a_μ der Streufaktor des Wandreibungskoeffizienten μ ;

a_K der Streufaktor für das Horizontallastverhältnis K des Schüttguts.

(4) Für spezielle Silos oder spezielle Schüttgüter (im Einzelfall) können geeignete Schüttgutbeiwerte für die Teilflächenlast C_{op} über großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen in Silos mit vergleichbarer Bauart ermittelt werden.

7 Lasten auf vertikale Silowände

7.1 Allgemeines

(1) Für die Lastfälle Füllen und Entleeren sind die in diesem Abschnitt beschriebenen charakteristischen Werte der Lasten anzusetzen. Dabei wird unterschieden zwischen Lasten auf:

- schlanke Silos;
- Silos mit mittlerer Schlankheit;
- niedrige Silos;
- Stützwandsilos (Silos bestehend aus Stützwänden);
- Silos für die Lagerung von Schüttgüter mit zwischen den Schüttgutpartikeln eingelagerter Luft (z. B. infolge pneumatischer Entleerungshilfen, Homogenisierungssilos);
- Silotrichter und -böden.

(2) Die Lasten auf die vertikalen Silowände sind entsprechend den folgenden Kriterien der Schlankheit des Silos zu bestimmen:

- schlanke Silos, mit $2,0 \leq h_c/d_c$ (mit Ausnahmen nach 5.3);
- Silos mit mittlerer Schlankheit, mit $1,0 < h_c/d_c < 2,0$ (mit Ausnahmen nach 5.3);
- niedrige Silos, mit $0,4 < h_c/d_c \leq 1,0$ (mit Ausnahmen nach 5.3);
- Stützwandsilos (Silos bestehend aus Stützwänden) mit waagerechtem Boden und $h_c/d_c \leq 0,4$;
- Silos für Schüttgüter mit zwischen den Schüttgutpartikeln eingelagerter Luft.

(3) Ein Silo mit einem belüfteten Boden ist unabhängig von seiner tatsächlichen Schlankheit h_c/d_c wie ein schlanker Silo zu behandeln.

(4) Die Lasten auf die vertikalen Wände setzen sich aus einem ortsfesten Lastanteil, den symmetrischen Lasten und einem freien Lastanteil, den Teilflächenlasten, zusammen. Beide Anteile sind als gleichzeitig wirkend anzusetzen.

(5) Für große Füll- und Entleerungsexzentrizitäten sind spezielle Lastfälle zu berücksichtigen. Diese sind nicht gleichzeitig mit den symmetrischen und Teilflächenlasten anzusetzen, sondern jeder stellt einen getrennten und fest umrissenen Lastfall dar.

(6) Ausführliche Regeln zur Berechnung der Füll- und Entleerungslasten sind in Abhängigkeit von der Siloschlankeit in 7.2, 7.3 und 7.4 angegeben.

(7) Regeln für zusätzliche Lastfälle für spezielle Silotypen und Bemessungssituationen sind in 7.5 bis 7.7 angegeben:

- Silos mit Lufteinblasvorrichtungen zum vollen oder teilweisen Fluidisieren des Schüttgutes, siehe in 7.5;
- Lasten infolge von heiß eingefüllten Schüttgütern, siehe in 7.6;
- Lasten in rechteckigen Silos, siehe in 7.7.

(8) Für kreisförmige Silos mit großen Füll- und Entleerungsexzentrizitäten sind Lastansätze in 7.2.4 angegeben. Für nichtkreisförmige Silozellen sollten hieraus entsprechende Lastansätze abgeleitet werden, wenn sich diese Lastansätze als bemessungsrelevant erweisen sollten.

(9) Wenn ein Schlotfluss innerhalb des Schüttgutes ohne Kontaktbereiche zwischen Fließzone und Silowand sichergestellt werden kann (siehe 5.3 (4)), kann sich die Bemessung auf den Ansatz der Fülllasten beschränken, wobei erforderlichenfalls die Teilflächenlasten mit zu berücksichtigen sind.

7.2 Schlanke Silos

7.2.1 Fülllasten auf vertikale Silowände

7.2.1.1 Symmetrische Fülllasten

(1) Die symmetrischen Fülllasten (siehe Bild 8) sind nach den Gleichungen (9) bis (14) zu berechnen.

(2) Nach dem Füllen und während der Schüttgutlagerung sind die Horizontallasten p_{hf} , die Wandreibungslasten p_{wf} und die Vertikallasten p_{vf} wie folgt anzunehmen:

$$p_{hf}(z) = p_{ho} Y_J(z) \quad (9)$$

$$p_{wf}(z) = \mu p_{ho} Y_J(z) \quad (10)$$

$$p_{vf}(z) = \frac{p_{ho}}{K} Y_J(z) \quad (11)$$

mit:

$$p_{ho} = \gamma K z_0 \quad (12)$$

$$z_0 = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U} \quad (13)$$

$$Y_J(z) = 1 - e^{-z/z_0} \quad (14)$$

DIN 1055-6:2005-03

Dabei ist

- γ der charakteristische Wert der Schüttgutwichte;
- μ der charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten für das Schüttgut an der vertikalen Silowand;
- K der charakteristische Wert des Horizontallastverhältnisses;
- z die Siloguttiefe unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche des Schüttgutes;
- A die innere Querschnittsfläche des Silos;
- U der Umfang der inneren Querschnittsfläche des Silos.

(3) Für den Zustand nach dem Füllen errechnet sich der resultierende charakteristische Wert der bis zur Tiefe z aufsummierten Wandreibungslasten P_{wf} – mit der Einheit Kraft durch Längeneinheit in Umfangsrichtung der Wand, z. B. [kN/m] – aus:

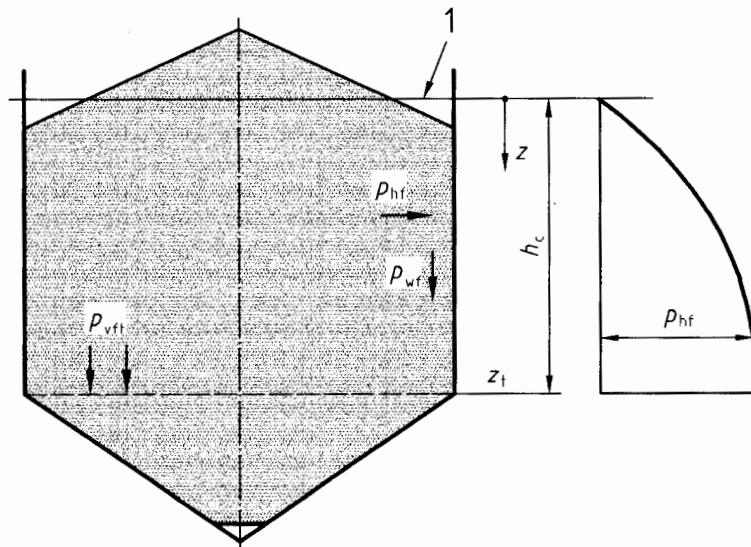
$$P_{wf} = \int_0^z p_{wf}(z) dz = \mu \rho_{ho} [z - z_0 Y_J(z)] \quad (15)$$

(4) Zur Bestimmung der charakteristischen Werte für die erforderlichen Schüttgutkennwerte (Wichte γ , Wandreibungskoeffizient μ und Horizontallastverhältnis K) sind die unter 6.2 und 6.3 beschriebenen Verfahren anzuwenden.

7.2.1.2 Teilflächenlast für den Lastfall Füllen: allgemeine Erfordernisse

(1) Zur Berücksichtigung von unplanmäßigen unsymmetrischen Lasten infolge von Exzentrizitäten und Imperfektionen beim Befüllen der Silos, sind beim Lastfall Füllen Teilflächenlasten oder andere geeignete Lastansätze anzusetzen.

(2) Bei Silos der Anforderungsklasse 1 kann die Teilflächenlast für den Lastfall Füllen vernachlässigt werden.



Legende

- 1 äquivalente Schüttgutoberfläche

Bild 8 — Symmetrische Fülllasten im Bereich der vertikalen Silowände

(3) Bei Silos zur Lagerung von staubförmigen Schüttgütern, die unter Zuhilfenahme von Lufteinblasvorrichtungen befüllt werden, kann im Regelfall auf den Ansatz der Teilflächenlasten für den Lastfall Füllen verzichtet werden.

(4) Der Betrag der für den Lastfall Füllen anzusetzenden Teilflächenlast p_{pf} ist unter Zugrundelegung der maximal möglichen Exzentrizität e_f des sich einstellenden Aufschüttkegels an der Schüttgutoberfläche zu ermitteln (siehe Bild 1b).

(5) Der Grundwert der Teilflächenlast für den Lastfall Füllen p_{pf} ist anzusetzen mit:

$$p_{pf} = C_{pf} p_{hf} \quad (16)$$

mit:

$$C_{pf} = 0,21 C_{op} (1 + 2 E^2) (1 - e^{(-1,5[(h_c/d_c)-1]})} \quad (17)$$

$$E = 2 e_f / d_c \quad (18)$$

$$\text{aber } C_{pf} \geq 0 \quad (19)$$

Dabei ist

e_f die maximale Exzentrizität des Aufschüttkegels, der sich beim Befüllen an der Schüttgutoberfläche einstellt;

p_{hf} der lokale Wert des horizontalen Fülldruckes nach Gleichung (9) an der Stelle, an der die Teilflächenlast angesetzt wird;

C_{op} der Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast (siehe Tabelle E.1).

(6) Die Höhe des Bereiches, auf den die Teilflächenlast anzusetzen ist (siehe Bilder 9 und 10), beträgt:

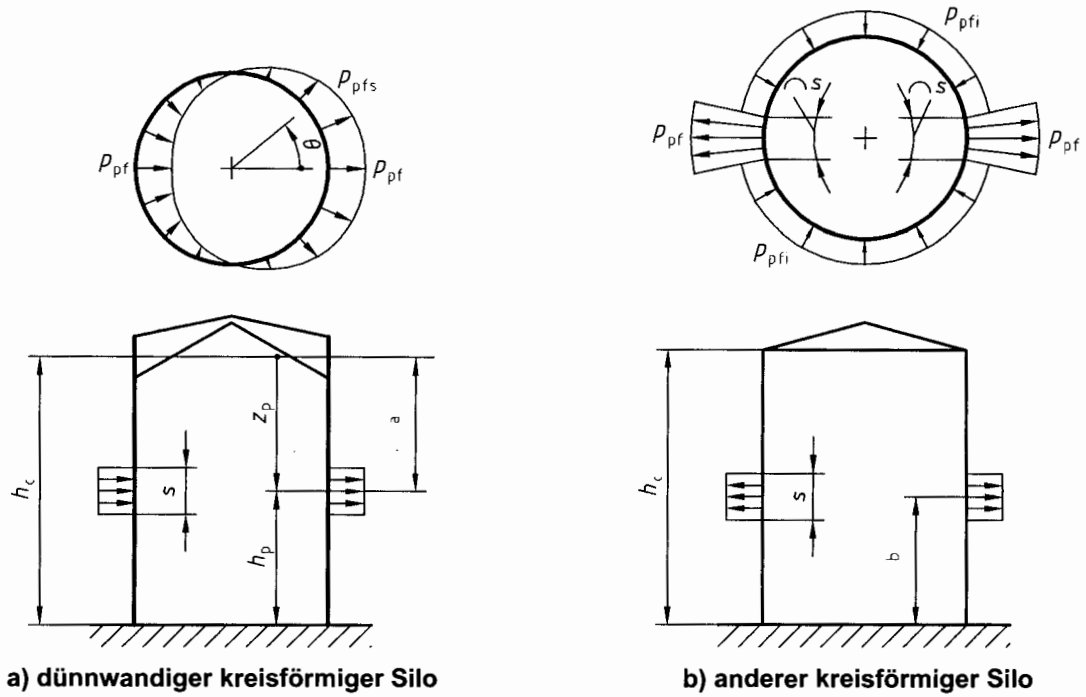
$$s = \pi d_c / 16 \approx 0,2 d_c \quad (20)$$

(7) Die Teilflächenlast besteht nur aus einem horizontal wirkenden Lastanteil. Es sind keine Reibungskräfte infolge dieser horizontalen Lastkomponente zu berücksichtigen.

(8) Die Form der Teilflächenlast für den Lastfall Füllen hängt von der Konstruktionsform des Silos ab. Es wird hinsichtlich der anzusetzenden Teilflächenlasten zwischen folgenden Konstruktionsformen von Silos unterschieden:

- dickwandige Silos mit kreisförmigem Querschnitt, siehe 7.2.1.3 (z. B. Stahlbetonsilos);
- dünnwandige Silos mit kreisförmigem Querschnitt, siehe 7.2.1.4 (z. B. Metallsilos ohne Steifen);
- Silos mit nicht kreisförmigem Querschnitt, siehe 7.2.1.5.

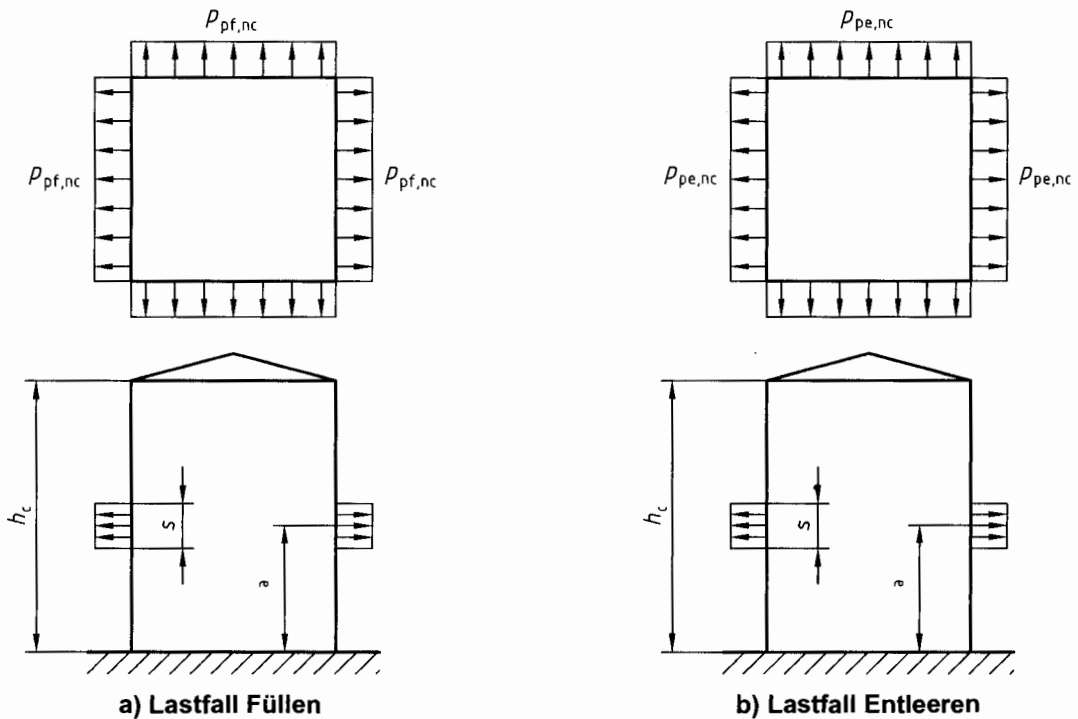
DIN 1055-6:2005-03



Legende

- a kleinerer Wert von z_o und $h_c/2$
- b beliebig

Bild 9 — Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten



Legende

- b beliebig

Bild 10 — Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten für nicht kreisförmige Silos

7.2.1.3 Teilflächenlast für den Lastfall Füllen: dickwandige kreisförmige Silos

(1) Bei dickwandigen kreisförmigen Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 ist der Grundwert der Teilflächenlast für den Lastfall Füllen p_{pf} auf einer quadratischen Teilfläche mit der Seitenlänge s (siehe Gleichung (20)) an entgegengesetzten Seiten nach außen wirkend anzusetzen. Das Maß für die Seitenlänge s ist in geeigneter Weise auf die gekrümmte Fläche zu beziehen (siehe Bild 9b).

(2) Zusätzlich zur nach außen wirkenden Teilflächenlast p_{pf} ist im verbleibenden Bereich des Siloumfanges über die gleiche Wandhöhe (siehe Bild 9b) eine nach innen gerichtete komplementäre Teilflächenlast p_{pfi} anzusetzen, mit:

$$p_{pfi} = p_{pf} / 7 \quad (21)$$

Dabei ist

p_{pf} der Grundwert der nach außen wirkenden Teilflächenlast für den Lastfall Füllen nach Gleichung (16).

ANMERKUNG Der Betrag und die Wirkungsfläche der nach innen gerichteten Last p_{pfi} sind so gewählt, dass sich die Resultierenden der beiden Lastanteile an der Stelle, an der diese anzusetzen sind, sich im Mittel aufheben.

(3) Die Teilflächenlast für den Lastfall Füllen ist an jeder beliebigen Stelle der Silowand anzusetzen. Dies kann aber in der unter 7.2.1.3 (4) beschriebenen Weise ausgelegt werden.

(4) In dickwandigen kreisförmigen Silos der Anforderungsklasse 2 kann ein vereinfachter Nachweis geführt werden. Als die ungünstigste Stelle für den Ansatz der Teilflächenlast kann die halbe Höhe des vertikalen Zellschnitts angesehen werden. Die größte prozentuale Erhöhung der Bemessungsschnittgrößen als Ergebnis aus einem Ansatz der Teilflächenlast an dieser Stelle kann auf die anderen Wandbereiche übertragen werden, indem dort Bemessungsschnittgrößen mit dem Verhältniswert zwischen horizontalem Fülldruck an der betrachteten Stelle und dem horizontalen Fülldruck an der Ansatzstelle der Teilflächenlast multipliziert werden.

7.2.1.4 Teilflächenlast für den Lastfall Füllen: dünnwandige kreisförmige Silos

(1) Bei dünnwandigen kreisförmigen Silos ($d_c/t > 200$) der Anforderungsklassen 2 und 3 ist die Teilflächenlast für den Lastfall Füllen über die Höhe s nach Gleichung (20) anzusetzen. Sie geht von einem an einer Stelle nach außen wirkenden Maximaldruck mit dem Betrag p_{pf} in einen maximalen nach innen wirkenden Druck gleichen Betrags p_{pf} auf der gegenüberliegenden Seite über (siehe Bild 9a). Der Verlauf in Umfangsrichtung ist anzusetzen mit:

$$p_{pfs} = p_{pf} \cos \theta \quad (22)$$

Dabei ist

p_{pf} die nach außen wirkende Teilflächenlast nach Gleichung (16);

θ die Winkelkoordinate in Umfangsrichtung (siehe Bild 9a).

(2) Die aus der Teilflächenlast des Lastfalls Füllen resultierende Horizontallast F_{pf} ist bei dünnwandigen kreisförmigen Silos nach Gleichung (23) zu berechnen:

$$F_{pf} = \pi/2 s d_c p_{pf} \quad (23)$$

DIN 1055-6:2005-03

(3) Bei geschweißten Silos der Anforderungsklasse 2 kann die Teilflächenlast als in einer Tiefe z_p unterhalb der Schüttgutoberfläche wirkend angesetzt werden. Für z_p ist der kleinere der folgenden Werte maßgebend:

$$z_p = z_o \text{ und } z_p = 0,5 h_c \quad (24)$$

wobei für h_c die Höhe des vertikalen Siloschaftes anzusetzen ist (siehe Bild 1a).

(4) Bei Silos mit Bolzen- und Schraubenverbindungen der Anforderungsklasse 2 ist die Teilflächenlast an jeder beliebigen Stelle wirkend anzusetzen.

7.2.1.5 Teilflächenlast für den Lastfall Füllen: nicht kreisförmige Silos

(1) Bei nicht kreisförmigen Silos der Anwendungsklassen 2 und 3 können die Teilflächenlasten des Lastfalls Füllen durch eine Erhöhung der symmetrischen Lasten nach (2) und (3) berücksichtigt werden.

(2) Die nach außen gerichtete Teilflächenlast ist an jeder Stelle und Tiefe im Silo als streifenförmiges Lastband mit der Bandbreite s (nach Gleichung (20)) anzusetzen (siehe Bild 10a).

(3) Der Betrag der gleichmäßigen Teilflächenlast $p_{pf,nc}$ ist mit

$$p_{pf,nc} = 0,36 p_{pf} \quad (25)$$

anzusetzen, wobei p_{pf} der Grundwert der Teilflächenlast des Lastfalls Füllen nach Gleichung (16) darstellt. Eine geeignete Abschätzung für d_c ist aus Bild 1d abzuleiten.

ANMERKUNG Der Wert und der Umfang der gleichmäßigen Last $p_{hf,n}$ sind so gewählt, dass die resultierenden Biegemomente bei einem Silo mit rechteckigem Siloquerschnitt ohne innere Zugglieder näherungsweise die gleichen Größenordnungen annehmen, wie sich diese beim Ansatz einer lokalen Teilflächenlast p_{pf} in der Mitte der Wand ergeben würden.

7.2.2 Entleerungslasten auf vertikale Wände**7.2.2.1 Symmetrische Entleerungslasten**

(1) Zur Berücksichtigung von möglichen kurzzeitigen Lastzunahmen während der Entleerungsvorgänge ist im Lastfall Entleeren eine Erhöhung der symmetrischen Lastanteile anzusetzen.

(2) Bei Silos aller Anforderungsklassen sind die symmetrischen Entleerungslasten p_{he} und p_{we} zu bestimmen aus:

$$p_{he} = C_h p_{hf} \quad (26)$$

$$p_{we} = C_w p_{wf} \quad (27)$$

Dabei ist

C_h der Entleerungsfaktor für die Horizontallasten;

C_w der Entleerungsfaktor für die Wandreibungslasten.

Die Entleerungsfaktoren C_h and C_w sind je nach vorliegendem Fall aus den Gleichungen (28) bis (32) zu ermitteln.

(3) Bei Silos aller Anforderungsklassen, die von der Schüttgutoberfläche aus entleert werden (und somit kein Fließen innerhalb des gespeicherten Schüttgutes aufweisen), können die Werte von C_h und C_w zu

$$C_h = C_w = 1,0 \quad (28)$$

angenommen werden.

(4) Bei schlanken Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 sind die Entleerungsfaktoren mit

$$C_h = 1,15 \quad (29)$$

$$C_w = 1,10 \quad (30)$$

anzusetzen.

(5) Bei schlanken Silos der Anforderungsklasse 1, bei denen die Mittelwerte der Schüttgutkennwerte K und μ zur Lastermittlung verwendet werden, sind als Entleerungsfaktoren folgende Werte anzunehmen:

$$C_h = 1,15 + 1,5 (1 + 0,4 e/d_c) C_{op} \quad (31)$$

$$C_w = 1,4 (1 + 0,4 e/d_c) \quad (32)$$

$$e = \max(e_f, e_o) \quad (33)$$

Dabei ist

e_f die maximale Exzentrizität des Aufschüttkegels, der sich beim Befüllen an der Schüttgutoberfläche einstellt (siehe Bild 1b);

e_o die Exzentrizität des Mittelpunktes der Auslauföffnung;

C_{op} der Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast (siehe Tabelle E.1).

(6) Für den Lastfall Entleeren errechnet sich der resultierende charakteristische Wert der bis zur Tiefe z aufsummierten Wandreibungslasten P_{we} – mit der Einheit Kraft je Längeneinheit der Umfangsrichtung der Wand, z. B. [kN/m] – aus:

$$P_{we} = \int_0^z p_{we}(z) dz = C_w \mu p_{ho} [z - z_o Y_J(z)] \quad (34)$$

7.2.2.2 Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren: allgemeine Erfordernisse

(1) Teilflächenlasten für den Lastfall Entleeren sind anzusetzen, um zum einen die unplanmäßigen unsymmetrischen Lasten beim Entleeren der Silos, und zum anderen die Exzentrizitäten beim Befüllen und Entleeren zu berücksichtigen (siehe Bild 1b).

(2) Bei Silos der Anforderungsklasse 1 darf die Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren vernachlässigt werden.

(3) Bei Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 sind zur Abschätzung der Entleerungslasten die Verfahren dieses Abschnittes anzuwenden.

(4) Bei Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 sind zusätzlich zu den Verfahren dieses Abschnittes die Lastansätze bei schlanken Silos (7.2.4) mit großen Entleerungsexzentrizitäten (siehe 7.1 (5)) als ein separater Lastfall anzuwenden, wenn eine der folgenden Bedingungen zutrifft:

DIN 1055-6:2005-03

- die Exzentrizität der Auslauföffnung e_o ist größer als der kritische Wert $e_{o,cr} = 0,25d_c$ (siehe Bild 4c);
- die maximale Exzentrizität beim Füllen e_f ist größer als der kritische Wert $e_{f,cr} = 0,25d_c$ und die Siloschlankheit ist größer als der Grenzwert $(h_c/d_c)_{lim} = 4,0$ (siehe Bild 5d).

(5) Der Grundwert der nach außen wirkenden Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren p_{pe} ist anzusetzen mit:

$$p_{pe} = C_{pe} p_{he} \quad (35)$$

mit:

$$C_{pe} = 0,42 C_{op} (1 + 2E^2) (1 - e^{(-1,5[(h_c/d_c)-1])}) \quad (36)$$

$$E = 2e / d_c \quad (37)$$

$$\text{aber } C_{pe} \geq 0,272 C_{op} [(h_c/d_c - 1) + E] \geq 0 \text{ für } (h_c/d_c) \leq 1,2 \quad (38)$$

$$e = \max(e_f, e_o) \quad (39)$$

Dabei ist

e_f die maximale Exzentrizität des Aufschüttkegels, der sich beim Befüllen an der Schüttgutoberfläche einstellt (siehe Bild 1b);

e_o die Exzentrizität des Mittelpunktes der Auslauföffnung;

p_{he} der lokale Wert des horizontalen Entleerungsdruckes nach Gleichung (26) an der Stelle, an der die Teilflächenlast angesetzt wird;

C_{op} der Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast (siehe Tabelle E.1).

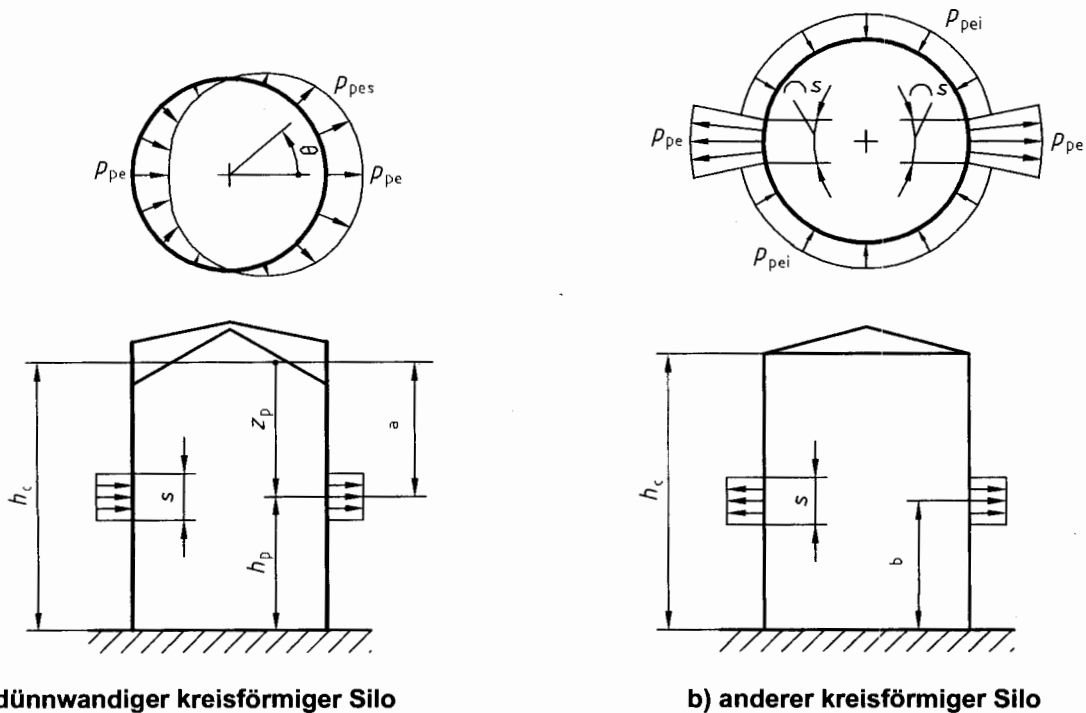
(6) Die Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren besteht nur aus einem horizontal wirkenden Lastanteil. Zusätzliche Reibungskräfte infolge dieser horizontalen Lastkomponente sind nicht zu berücksichtigen.

(7) Die Form der Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren hängt von der Konstruktionsart des Silos ab. In dieser Norm wird hinsichtlich der anzusetzenden Teilflächenlasten zwischen folgenden Konstruktionsarten von Silos unterschieden:

- dickwandige Silos mit kreisförmigem Querschnitt, siehe 7.2.2.3 (Stahlbetonsilos);
- dünnwandige Silos mit kreisförmigem Querschnitt, siehe 7.2.2.4 (Metallsilos);
- Silos mit nicht kreisförmigem Querschnitt, siehe 7.2.2.5.

7.2.2.3 Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren: dickwandige kreisförmige Silos

(1) Bei dickwandigen kreisförmigen Silos ist der Grundwert der Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren p_{pe} auf einer quadratischen Teilfläche mit der Seitenlänge s (siehe Gleichung (20)) an entgegengesetzten Seiten nach außen wirkend entsprechend der Abbildung in Bild 11b anzusetzen.



a) dünnwandiger kreisförmiger Silo

b) anderer kreisförmiger Silo

Legende

- a kleinerer Wert von z_0 und $h_d/2$
 b beliebig

Bild 11 — Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten bei Entleerung

(2) Zusätzlich zu der nach außen wirkenden Teilflächenlast p_{pe} ist im verbleibenden Bereich des Siloumfanges über die gleiche Wandhöhe (siehe Bild 11b) eine nach innen gerichtete komplementäre Teilflächenlast p_{pei} anzusetzen:

$$p_{pei} = p_{pe}/7 \quad (40)$$

wobei p_{pe} der Grundwert der nach außen gerichteten Teilflächenlast nach Gleichung (35) ist.

ANMERKUNG Der Betrag und die Wirkungsfläche der nach innen gerichteten Last p_{pei} sind so gewählt, dass sich die Resultierenden der beiden Lastanteile an der Stelle, an der diese anzusetzen sind, im Mittel aufheben.

(3) Die Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren ist an jeder beliebigen Stelle an der Silowand anzusetzen. Dies kann aber in der unter 7.2.2.3 (4) beschriebenen Weise ausgelegt werden.

(4) Bei dickwandigen kreisförmigen Silos der Anforderungsklasse 2 kann ein vereinfachter Nachweis geführt werden. Als die ungünstigste Stelle für den Ansatz der Teilflächenlast kann die halbe Höhe des vertikalen Zellschafts angesehen werden. Die prozentuale Steigerung der Bemessungsschnittgrößen als Ergebnis aus einem Ansatz der Teilflächenlast an dieser Stelle kann auf die anderen Wandbereiche übertragen werden, indem Bemessungsschnittgrößen dort mit dem Verhältniswert zwischen horizontalem Fülldruck an der betrachteten Stelle und dem horizontalen Fülldruck an der Ansatzstelle der Teilflächenlast multipliziert werden.

DIN 1055-6:2005-03**7.2.2.4 Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren: dünnwandige Silos**

(1) Bei dünnwandigen kreisförmigen Silos ($d_c/t > 200$) der Anwendungsklassen 2 und 3 ist die Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren über die Höhe s nach Gleichung (20) anzusetzen. Sie geht von einem an einer Stelle nach außen wirkenden Maximaldruck mit dem Betrag p_{pe} in einen maximalen nach innen wirkenden Druck gleichen Betrags p_{pe} auf der gegenüberliegenden Seite über (siehe Bild 11a). Der Verlauf in Umfangsrichtung ist anzusetzen mit:

$$p_{pes} = p_{pe} \cos \theta \quad (41)$$

Dabei ist

p_{pe} der Grundwert der nach außen gerichteten Teilflächenlast nach Gleichung (35);

θ die Winkelkoordinate in Umfangsrichtung (siehe Bild 11a).

(2) Die aus der Teilflächenlast des Lastfalls Entleeren resultierende Horizontallast F_{pe} ist bei dünnwandigen kreisförmigen Silos nach Gleichung (42) zu berechnen:

$$F_{pe} = \frac{\pi}{2} s d_c p_{pe} \quad (42)$$

(3) Bei geschweißten Silos der Anforderungsklasse 2 kann die Teilflächenlast als in einer Tiefe z_p unterhalb der Schüttgutoberfläche wirkend angesetzt werden. Für z_p ist der kleinere der folgenden Werte anzusetzen:

$$z_p = z_o \text{ und } z_p = 0,5 h_c \quad (43)$$

wobei für h_c die Höhe des vertikalen Siloschaftes anzusetzen ist (siehe Bild 1a).

(4) Bei Silos mit Bolzen- und Schraubenverbindungen der Anforderungsklasse 2 ist die Teilflächenlast an jeder beliebigen Stelle wirkend anzusetzen. Es darf alternativ das Verfahren nach 7.2.3 angewendet werden.

7.2.2.5 Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren: nicht kreisförmige Silos

(1) Bei nicht kreisförmigen Silos der Anwendungsklassen 2 und 3 können die Teilflächenlasten des Lastfalls Füllen durch eine Erhöhung der symmetrischen Lasten nach (2) und (3) berücksichtigt werden.

(2) Die nach außen gerichtete Teilflächenlast ist an jeder Stelle und Tiefe im Silo über eine Höhe s (nach Gleichung (20)) wirkend anzusetzen (siehe Bild 10b).

(3) Der Betrag der gleichmäßigen Teilflächenlast $p_{pe,nc}$ ist mit

$$p_{pe,nc} = 0,36 p_{pe} \quad (44)$$

anzusetzen, wobei p_{pe} den Grundwert der Teilflächenlast des Lastfalls Entleeren nach Gleichung (35) darstellt. Eine geeignete Abschätzung für d_c ist aus Bild 1d abzuleiten.

ANMERKUNG Der Wert und der Umfang der gleichmäßigen Last $p_{he,n}$ ist so gewählt, dass die resultierenden Biegemomente bei einem Silo mit rechteckigem Siloquerschnitt ohne innere Zugbänder näherungsweise die gleichen Größenordnung annehmen, wie sich diese beim Ansatz einer lokalen Teilflächenlast p_{pe} in der Mitte der Wand ergeben würden.

7.2.3 Gleichförmige Erhöhung der Lasten als Ersatz für die Teilflächenlasten der Lastfälle Füllen und Entleeren bei kreisförmigen Silos

(1) Bei kreisförmigen Silos der Anforderungsklasse 2 kann das Verfahren mit Teilflächenlasten nach 7.2.1 und 7.2.2 zur Berücksichtigung der Unsymmetrien beim Füllen und Entleeren näherungsweise durch eine gleichmäßige Erhöhung der Lasten ersetzt werden.

(2) Bei kreisförmigen Silos können die folgenden Vorgehensweisen nur angewendet werden, wenn der senkrechte Siloschaft an seinem unteren und oberen Ende ausreichend steif gegenüber horizontalen Verformungen ausgebildet ist und eine ausreichende Querverteilung der Last gewährleistet ist. Die Silozylinderschale muss am oberen Ende und am Fußpunkt entlang ihres Umfangs z. B. über eine konstruktive Verbindung mit dem Dach oder eine Ringsteife gehalten sein.

(3) Bei dickwandigen kreisförmigen Silos sind die resultierenden Horizontallasten für die Lastfälle Füllen ($\rho_{hf,u}$) und Entleeren ($\rho_{he,u}$) zu berechnen aus

$$\rho_{hf,u} = \rho_{hf} (1 + \zeta C_{pf}) \quad (45)$$

$$\rho_{he,u} = \rho_{he} (1 + \zeta C_{pe}) \quad (46)$$

mit:

$$\zeta = 0,5 + 0,01 (d_c/t) \quad (47)$$

und

$$\zeta \geq 1,0 \quad (48)$$

Dabei ist

ρ_{hf} die symmetrischen Horizontallasten nach dem Füllen nach Gleichung (9);

ρ_{he} die symmetrischen Horizontallasten beim Entleeren nach Gleichung (26);

C_{pf} der Beiwert für die Teilflächenlasten für den Lastfall Füllen nach Gleichung (17);

C_{pe} der Beiwert für die Teilflächenlasten für den Lastfall Entleeren nach Gleichung (36).

(4) Bei dünnwandigen kreisförmigen Silos sind die resultierenden Horizontallasten für die Lastfälle Füllen ($\rho_{hf,u}$) und Entleeren ($\rho_{he,u}$) und die daraus resultierenden Wandreibungslasten $\rho_{wf,u}$ und $\rho_{we,u}$ zu berechnen aus

$$\rho_{hf,u} = \rho_{hf} (1 + 0,5 C_{pf}) \quad (49)$$

$$\rho_{wf,u} = \rho_{wf} (1 + C_{pf}) \quad (50)$$

$$\rho_{he,u} = \rho_{he} (1 + 0,5 C_{pe}) \quad (51)$$

$$\rho_{we,u} = \rho_{we} (1 + C_{pe}) \quad (52)$$

Dabei ist

ρ_{wf} die symmetrischen Wandreibungslasten des Lastfalls Füllen nach Gleichung (10);

ρ_{we} die symmetrischen Wandreibungslasten des Lastfalls Entleeren nach Gleichung (27).

Die Parameter ρ_{hf} , ρ_{he} , C_{pf} und C_{pe} sind nach dem unter (3) beschriebenen Vorgehen zu berechnen.

DIN 1055-6:2005-03**7.2.4 Entleerungslasten für kreisförmige Silos mit großen Exzentrizitäten bei der Entleerung****7.2.4.1 Allgemeines**

(1) Bei Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 ist die Exzentrizität der Auslauföffnung e_o größer als der kritische Wert $e_{o,cr} = 0,25d_c$, sind zur Berücksichtigung der exzentrischen Entleerung in Form eines Schlotflusses oberhalb der Auslauföffnung nachfolgende Verfahren zur Bestimmung der Lastverteilung anzunehmen (siehe Bild 12a).

(2) Bei Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 ist die maximale Exzentrizität beim Befüllen e_f größer als der kritische Wert $e_{f,cr} = 0,25d_c$ und die Siloschlankheit größer als $h_c/d_c = 4,0$, sind die nachfolgenden Verfahren zur Bestimmung der Silodruckverteilung anzuwenden. Diese Druckverteilung kann sich infolge der Ausbildung eines exzentrischen Schlotfließkanals (siehe Bilder 5d und 12a) einstellen.

(3) Falls die Notwendigkeit der Anwendung der Verfahren nach 7.2.4.2 und 7.2.4.3 gegeben ist, sind diese zusätzlich zu den Füll- und Entleerungslasten und den Ansätzen der Teilflächenlasten nach 7.2.2 und 7.2.3 als separate Lastfälle zu behandeln.

(4) Die Ermittlung dieser Lasten ist unter Verwendung des unteren charakteristischen Wertes der Wandreibung μ und des oberen charakteristischen Wertes des Winkels der inneren Reibung ϕ_i durchzuführen.

(5) Bei Silos der Anforderungsklasse 2 ist ein vereinfachtes Verfahren nach 7.2.4.2 erlaubt. Bei Silos der Anforderungsklasse 3 sind die Verfahren nach 7.2.4.3 durchzuführen.

7.2.4.2 Verfahren für Silos der Anforderungsklasse 2**7.2.4.2.1 Geometrie des Fließkanals**

(1) Bei Silos der Anforderungsklasse 2 müssen die Berechnungen nur für eine Größe des in Kontakt mit der Silowand befindlichen Fließkanals durchgeführt werden. Die Größe der Fließzone ist dabei über den Wert des Winkels

$$\theta_c = 35^\circ \quad (53)$$

zu bestimmen.

7.2.4.2.2 Wanddrücke bei exzentrischer Entleerung

(1) In der Fließzone sind die Horizontallasten auf die vertikale Silowand (siehe Bild 12c) zu

$$p_{hce} = 0 \quad (54)$$

anzunehmen.

(2) Im Bereich, in dem das Schüttgut in Ruhe bleibt, sind die Horizontallasten auf die vertikale Silowand in einer Tiefe z (siehe Bild 12c) anzusetzen mit:

$$p_{hse} = p_{hf} \quad (55)$$

$$p_{hae} = 2 p_{hf} \quad (56)$$

und die Wandreibungslast an der Wand in der Tiefe z :

$$p_{wse} = p_{wf} \quad (57)$$

$$p_{wae} = 2 p_{wf} \quad (58)$$

Dabei ist

p_{hf} die Horizontallast des Lastfalls Füllen nach Gleichung (9);

p_{wf} die Wandreibungslast des Lastfalls Füllen nach Gleichung (10).

ANMERKUNG Dieses vereinfachte Verfahren entspricht einem „leeren“ Schlot und ist sehr konservativ.

(3) Alternativ können auch die Verfahren nach 7.2.4.3.2 angewendet werden.

7.2.4.3 Verfahren für Silos der Anforderungsklasse 3

7.2.4.3.1 Geometrie des Fließkanals

(1) Die Geometrie und Lage des Fließkanals sind so zu wählen, dass dadurch die Geometrie des Silos, die Entleerungsbedingungen und die Schüttguteigenschaften angemessen berücksichtigt werden.

(2) Wenn die Entleerungsbedingungen zur Ausbildung eines Fließkanals mit eindeutig definierter Geometrie und Lage führen, sollten für das weitere Vorgehen die aus diesem Fließkanal ableitbaren Parameter angenommen werden.

(3) Wenn die Geometrie des Fließkanals nicht unmittelbar aus der Anordnung der Auslauföffnung und der Silogeometrie abgeleitet werden kann, sind Berechnungen mit mindestens drei verschiedenen Fließkanalradien r_c durchzuführen, um die zufällige Veränderlichkeit der Größe des Fließkanals mit der Zeit zu berücksichtigen. Es sollten folgende drei Werte betrachtet werden:

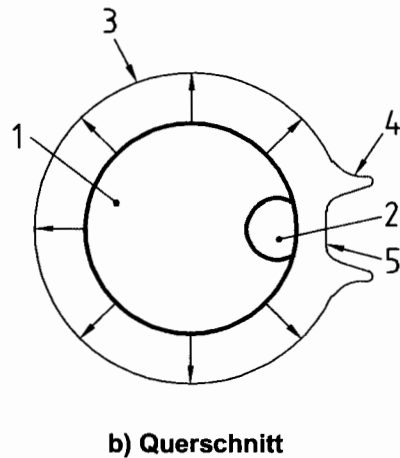
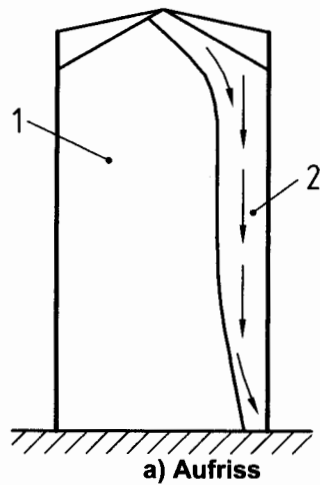
$$r_c = 0,5 r \quad (59)$$

$$r_c = 0,75 r \quad (60)$$

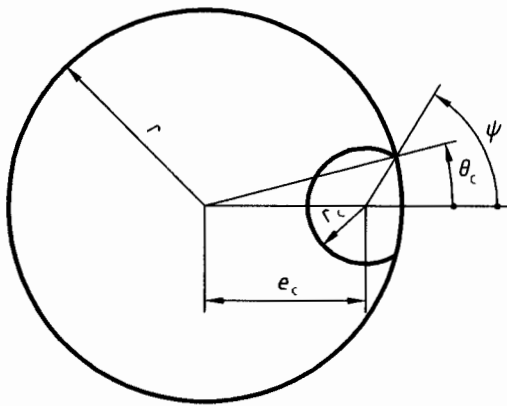
$$r_c = 0,9 r \quad (61)$$

wobei

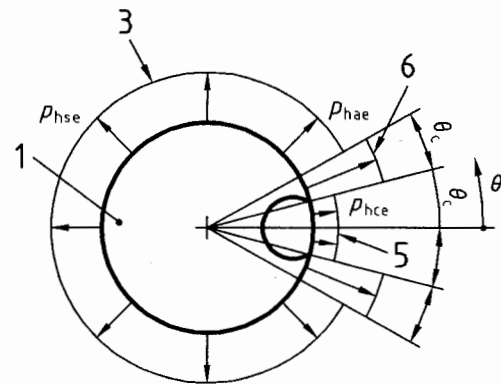
r der Radius des kreisförmigen Silos ($= d_c/2$) ist.



a) Fließkanal und Ruckverteilung



b) Geometrie des Fließkanals



Lasten variieren mit der Tiefe im Silo

c) Drücke

Legende

- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| 1 Schüttgut in Ruhe | 4 Lokal hohe Lasten |
| 2 Fließkanal | 5 Lasten in der Fließzone |
| 3 Lasten in der statischen Zone | 6 Fließkanal-Randlasten |

Bild 12 — Fließkanal und Druckverteilung bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten

(4) Die Exzentrizität des Fließkanals e_c (siehe Bild 12) errechnet sich zu:

$$e_c = r \{ \eta (1 - G) + (1 - \eta) \sqrt{1 - G} \} \tag{62}$$

mit:

$$G = r_c / r \tag{63}$$

und

$$\eta = \mu / \tan \varphi_i \tag{64}$$

Dabei ist

- μ der untere charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten für die vertikale Silowand;
- φ_1 der obere charakteristische Wert des Winkels der inneren Reibung des gelagerten Schüttgutes;
- r_c der Bemessungswert des Fließkanalradius nach den Gleichungen (59) bis (61).

ANMERKUNG 1 Es wird darauf hingewiesen, dass stets $\varphi_w \leq \varphi_1$ gegeben ist, da sich sonst eine Gleitfläche innerhalb des Schüttgutes ausbilden würde. Das bedeutet, dass in Gleichung (64) stets $\eta \leq 1$.

ANMERKUNG 2 Die Exzentrizität des Fließkanals e_c kann, wie in Bild 5d angedeutet, variieren. Sie hängt nicht nur ausschließlich von der Exzentrizität der Auslauföffnung ab. Das angegebene Verfahren sieht vor, diejenigen Situationen zu berücksichtigen, die für jede Silogeometrie und konstruktive Anordnung zu den ungünstigsten Verhältnissen führen. Die Exzentrizität des Fließkanals kann im Ergebnis daher kleiner als die kritische Füllexzentrizität $e_{r,cr}$ und kleiner als die kritische Entleerungsexzentrizität $e_{o,cr}$ sein.

ANMERKUNG 3 Diese Bestimmung der Lage und Größe des Fließkanals basiert auf dem Prinzip der Minimierung des Reibungswiderstands des Schüttguts an der Umfangsfläche des Fließkanals unter der vereinfachten Annahme, dass der Umfang des Fließkanals ein kreisförmiger Bogen ist. Es können auch andere geeignete Verfahren zur Bestimmung des Umfangs des Fließkanals angewendet werden.

(5) Neben den unter (3) angeführten Fließkanalgeometrien ist bei Trichtern für „erweitertes Fließen“ (siehe Bild 6d) der zusätzliche Fall eines Fließkanals mit einem Radius r_c entsprechend dem Radius des Siloquerschnittes am oberen Ende des Trichters für „erweitertes Fließen“ zu betrachten.

(6) Die Begrenzung der Kontaktfläche zwischen Fließkanal und Silowand ist durch die Umfangswinkel $\theta = \pm \theta_c$ definiert, wobei:

$$\cos \theta_c = (r^2 + e_c^2 - r_c^2) / (2r e_c) \quad (65)$$

(7) Die Bogenlänge der Kontaktfläche zwischen Fließkanal und Wand ist:

$$U_{wc} = 2 \theta_c r \quad (66)$$

und die Bogenlänge der Kontaktfläche zwischen Fließkanal und dem sich in Ruhe befindlichen Schüttgut:

$$U_{sc} = 2 r_c (\pi - \psi) \quad (67)$$

wobei:

$$\sin \psi = \frac{r}{r_c} \sin \theta_c \quad (68)$$

und die beiden Winkel θ_c und ψ im Bogenmaß einzusetzen sind.

(8) Die Querschnittsfläche des Fließkanals ist wie folgt zu berechnen:

$$A_c = (\pi - \psi) r_c^2 + \theta_c r_c^2 - r r_c \sin (\psi - \theta_c) \quad (69)$$

7.2.4.3.2 Wandlasten bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten

(1) Die Horizontallasten auf die vertikalen Wände im Bereich des Fließkanals (siehe Bild 12c) sind von der Tiefe z unter der äquivalenten Schüttgutoberfläche abhängig und berechnen sich nach:

DIN 1055-6:2005-03

$$p_{hce} = p_{hco} (1 - e^{-z/z_{oc}}) \quad (70)$$

Die auf die Wand in der Tiefe z wirkenden Wandreibungslasten bestimmen sich nach Gleichung (71) zu:

$$p_{wce} = \mu p_{hce} = \mu p_{hco} (1 - e^{-z/z_{oc}}) \quad (71)$$

mit:

$$p_{hco} = \gamma K z_{oc} \quad (72)$$

$$z_{oc} = \frac{1}{K} \left(\frac{A_c}{U_{wc}\mu + U_{sc} \tan \varphi_i} \right) \quad (73)$$

Dabei ist

μ der Wandreibungskoeffizient im Bereich der vertikalen Wand;

K das Horizontallastverhältnis des Schüttguts.

(2) Die Horizontallasten auf die Silowand in der Tiefe z im Bereich außerhalb der Fließzone, in dem sich das Schüttgut in Ruhe befindet (siehe Bild 12c), sind anzusetzen mit:

$$p_{hse} = p_{hf} \quad (74)$$

und die Wandreibungslast auf die Wand in der Tiefe z :

$$p_{wse} = p_{wf} \quad (75)$$

Dabei ist

p_{hf} die Horizontallasten des Lastfalls Füllen nach Gleichung (9);

p_{wf} die Wandreibungslasten des Lastfalls Füllen nach Gleichung (10).

(3) Unmittelbar am Übergang von der Fließzone zum Bereich, in dem sich das Schüttgut in Ruhe befindet, wirken höhere Lasten p_{hae} auf die vertikalen Silowände (siehe Bild 12c). Diese zusätzlichen in der Tiefe z unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche nach außen wirkenden Horizontallasten neben dem Fließkanal sind anzusetzen mit:

$$p_{hae} = 2p_{hf} - p_{hce} \quad (76)$$

und die zugehörigen Wandreibungslasten auf die Wand in der Tiefe z dementsprechend mit:

$$p_{wae} = \mu p_{hae} \quad (77)$$

7.3 Niedrige Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit

7.3.1 Fülllasten auf die vertikalen Wände

7.3.1.1 Symmetrische Fülllasten

(1) Die symmetrischen Lasten für den Lastfall Füllen (siehe Bild 13) sind nach den Gleichungen (78) bis (87) zu ermitteln.

(2) Die Werte für die Horizontallasten p_{hf} und die Wandreibungslasten p_{wf} für den Lastfall Füllen sind an jeder Stelle wie folgt anzusetzen:

$$p_{hf} = p_{ho} Y_R(z) \quad (78)$$

$$p_{wf} = \mu p_{hf} \quad (79)$$

mit:

$$p_{ho} = \gamma K z_o = \gamma \frac{1}{\mu} \frac{A}{U} \quad (80)$$

$$Y_R(z) = \left(1 - \left\{ \left(\frac{z - h_o}{z_o - h_o} \right) + 1 \right\}^n \right) \quad (81)$$

$$z_o = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U} \quad (82)$$

$$n = -(1 + \tan \varphi_r) (1 - h_o/z_o) \quad (83)$$

Dabei ist

h_o der vertikale Abstand zwischen der äquivalenten Schüttgutoberfläche und der höchstgelegenen Kontaktstelle vom gespeicherten Schüttgut mit der Wand (siehe Bilder 1a und 13).

Das Maß h_o ist anzunehmen mit

$$h_o = \frac{r}{3} \tan \varphi_r \quad \text{bei einem symmetrisch gefüllten kreisförmigen Silo} \quad (84)$$

und mit

$$h_o = \frac{d_c}{4} \tan \varphi_r \quad \text{bei einem symmetrisch gefüllten Rechtecksilo.} \quad (85)$$

Dabei ist

γ der charakteristische Wert für die Wichte des Schüttguts;

μ der charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten zwischen Schüttgut und vertikaler Silowand;

K der charakteristische Wert des Horizontallastverhältnisses des gespeicherten Schüttguts;

DIN 1055-6:2005-03

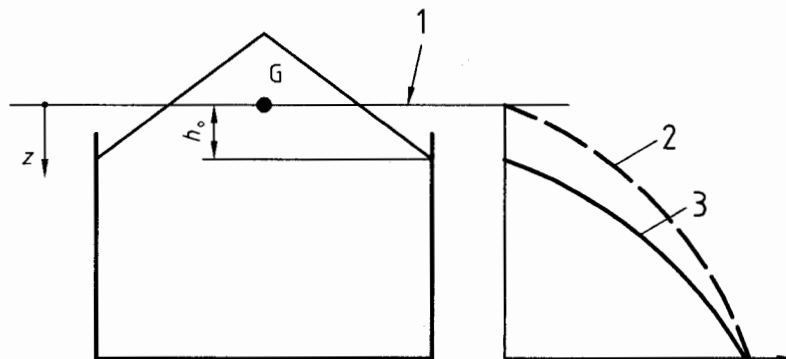
- z die Tiefe unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche;
 A die Querschnittsfläche des vertikalen Siloschaftes;
 U der innere Umfang des Querschnittes des vertikalen Siloschaftes;
 φ_r der Böschungswinkel des Schüttgutes (siehe Tabelle E.1).

(3) Der Betrag der Vertikallast p_{vf} in einer Tiefe z_v ist für den Lastfall Füllen anzusetzen mit:

$$p_{vf} = \gamma z_v \quad (86)$$

wobei:

$$z_v = h_o - \frac{1}{(n+1)} \left(z_o - h_o - \frac{(z + z_o - 2h_o)^{n+1}}{(z_o - h_o)^n} \right) \quad (87)$$

**Legende**

- 1 Äquivalente Schüttgutoberfläche
- 2 Silolasten nach den Regeln für schlanke Silos
- 3 Lasten für niedrige Silos

Bild 13 — Lasten in einem niedrigen Silo oder Silo mit mittlerer Schlankheit nach dem Füllen (Fülllasten)

(4) Für den Lastfall Füllen errechnet sich der resultierende charakteristische Wert der bis zu der Schüttguttiefe z aufsummierten Wandreibungslasten P_{wf} – mit der Einheit Kraft durch Längeneinheit in Umfangsrichtung der Wand, z. B. [kN/m] – aus:

$$P_{wf} = \int_0^z p_{wf}(z) dz = \mu p_{ho} (z - z_v) \quad (88)$$

mit z_v nach Gleichung (87).

7.3.1.2 Teilflächenlast für den Lastfall Füllen

(1) Die Teilflächenlasten p_{pf} im Lastfall Füllen sind zur Berücksichtigung von unplanmäßigen Lasten und von kleinen Füllungsexzentrizitäten (siehe Bild 1b) an jeder Stelle im Siloaufriß anzusetzen.

(2) Angaben zur Bestimmung der Form, der Lage und des Betrags der Teilflächenlast des Lastfalls Füllen sind den Regeln nach 7.2.1 zu entnehmen.

(3) Die Teilflächenlast besteht nur aus einem horizontal wirkenden Lastanteil. Es sind keine zusätzlichen Reibungslasten infolge dieser horizontalen Lastkomponente zu berücksichtigen.

(4) Bei niedrigen Silos ($h_c/d_c \leq 1,0$) aller Anforderungsklassen brauchen die Teilflächenlasten für den Lastfall Füllen nicht berücksichtigt zu werden ($C_{pf} = 0$).

(5) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit ($1,0 < h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklasse 1 brauchen die Teilflächenlasten für den Lastfall Füllen nicht berücksichtigt zu werden ($C_{pf} = 0$).

(6) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit ($1,0 < h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklassen 2 und 3 sind zur Berücksichtigung der zufälligen Unsymmetrien der Lasten und kleinerer Exzentrizitäten beim Befüllen e_f (siehe Bild 1b) die Teilflächenlasten für den Lastfall Füllen p_{pf} nach 7.2.1 zu verwenden.

7.3.2 Entleerungslasten auf die vertikalen Silowände

7.3.2.1 Symmetrische Entleerungslasten

(1) Beim Lastfall Entleeren ist zur Berücksichtigung von möglichen kurzzeitigen Lastzunahmen während der Entleerungsvorgänge eine Erhöhung der symmetrischen Lastanteile anzusetzen.

(2) Bei niedrigen Silos ($h_c/d_c \leq 1,0$) können die symmetrischen Entleerungslasten den Fülllasten nach 7.3.1 gleichgesetzt werden.

(3) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit ($1,0 < h_c/d_c < 2,0$) sind die symmetrischen Entleerungslasten p_{he} und p_{we} zu berechnen als:

$$p_{he} = C_h p_{hf} \quad (89)$$

$$p_{we} = C_w p_{wf} \quad (90)$$

Dabei ist

C_h und C_w die Entleerungsfaktoren für die Horizontal- und Wandreibungslasten entsprechend den Gleichungen (91) bis (96).

(4) Bei Silos aller Anforderungsklassen, die von der Schüttgutoberfläche aus entleert werden (somit kein Fließen innerhalb des gespeicherten Schüttgutes stattfindet), können die Werte C_h und C_w zu

$$C_w = C_h = 1,0 \quad (91)$$

angenommen werden.

(5) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit der Anforderungsklassen 2 und 3 sind die Entleerungsfaktoren anzusetzen mit:

$$C_h = 1,0 + 0,15 C_S \quad (92)$$

$$C_w = 1,0 + 0,1 C_S \quad (93)$$

mit C_S als Schlankheitsbeiwert:

$$C_S = h_c/d_c - 1,0 \quad (94)$$

DIN 1055-6:2005-03

(6) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit der Anforderungsklasse 1 sind, wenn in den Lastansätzen die Mittelwerte der Materialkennwerte K und μ verwendet wurden, die Entleerungsfaktoren wie folgt zu berechnen:

$$C_h = 1,0 + \{0,15 + 1,5 (1 + 0,4 e/d_c) C_{op}\} C_S \quad (95)$$

$$C_w = 1,0 + 0,4 (1 + 1,4 e/d_c) C_S \quad (96)$$

$$e = \max(e_f, e_o) \quad (97)$$

Dabei ist

e_f die maximale Exzentrizität des Anschüttkegels beim Befüllen;

e_o die Exzentrizität des Mittelpunktes der Auslauföffnung;

C_{op} der Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast nach Tabelle E.1;

C_S der Schlankheitsbeiwert nach Gleichung (94).

(7) Für den Lastfall Entleeren errechnet sich der resultierende charakteristische Wert der bis zur Tiefe z aufsummierten Wandreibringlasten P_{we} – mit der Einheit Kraft durch Längeneinheit in Umfangsrichtung der Wand, z. B. [kN/m] – aus:

$$P_{we} = \int_0^z p_{we}(z) dz = C_w \mu p_{ho} (z - z_v) \quad (97a)$$

mit z_v nach Gleichung (87).

7.3.2.2 Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren

(1) Die Teilflächenlasten p_{pe} im Lastfall Entleeren sind zur Berücksichtigung von unplanmäßigen Lasten und von kleinen Füllungsexzentrizitäten (siehe Bild 1b) anzusetzen.

(2) Angaben zur Bestimmung der Form, der Lage und des Betrags der Teilflächenlast des Lastfalls Entleeren sind den Regeln nach 7.2.2 zu entnehmen.

(3) Bei niedrigen Silos ($h_c/d_c \leq 1,0$) aller Anforderungsklassen kann bei einer Exzentrizität während des Entleerens e_o , die kleiner als der kritische Wert von $e_{o,cr} = 0,1d_c$ ist, der Ansatz einer Teilflächenlast für diesen Lastfall vernachlässigt werden (d. h. $C_{pe} = 0$).

(4) Bei niedrigen Silos und Silos mittlerer Schlankheit ($h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklasse 1 kann der Ansatz einer Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren vernachlässigt werden (d. h. $C_{pe} = 0$).

(5) Bei niedrigen Silos ($h_c/d_c \leq 1,0$) der Anforderungsklasse 2 und einer Exzentrizität während des Entleerens e_o , die größer als der kritische Wert von $e_{o,cr} = 0,1d_c$ ist, können die Ansätze nach 7.3.2.3 verwendet werden.

(6) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit ($1,0 < h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklasse 2 können die Ansätze nach 7.3.2.3 verwendet werden.

(7) Bei niedrigen Silos ($h_c/d_c \leq 1,0$) der Anforderungsklasse 3 und einer Exzentrizität während des Entleerens e_o , die größer als der kritische Wert von $e_{o,cr} = 0,1d_c$ ist, sind die Ansätze nach 7.2.2.2 bis 7.2.2.5 anzuwenden.

(8) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit ($1,0 < h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklasse 3 sind die Verfahren nach 7.2.2.2 bis 7.2.2.5 anzuwenden.

7.3.2.3 Gleichförmige Erhöhung der Horizontallasten als Ersatz für die Teilflächenlasten der Lastfälle Füllen und Entleeren

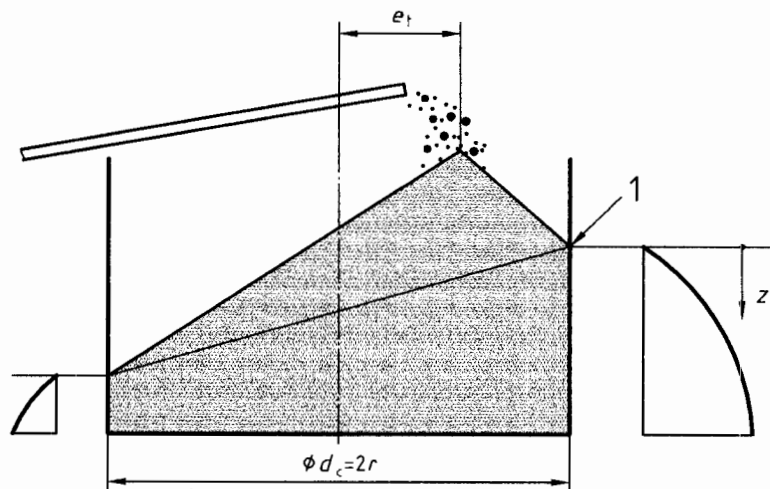
(1) Bei Silos der Anforderungsklasse 2 kann das Verfahren der Teilflächenlasten nach 7.3.1.2 und 7.3.2.2 zur Berücksichtigung der Unsymmetrien beim Füllen und Entleeren näherungsweise durch eine gleichmäßige Erhöhung der Horizontallasten ersetzt werden.

(2) Je nach vorliegendem Fall können die Verfahren nach 7.2.3 durch Verwendung der Gleichungen (45) bis (52) auf die Werte der Teilflächenlasten aus 7.3.1.2 und 7.3.2.2 angewandt werden.

7.3.3 Große Exzentrizitäten beim Befüllen von kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit

(1) Bei kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit ($h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklasse 3 und einer Exzentrizität des Aufschüttkegels beim Befüllen e_t , die größer als der kritische Wert von $e_{t,cr} = 0,25d_c$ (siehe Bild 14) ist, ist die Auswirkung der unsymmetrischen Lastverteilung auf die Vertikallasten in den Silowänden zu betrachten.

(2) Bei einer konventionellen Handrechnung sind die Erfordernisse von 7.3.3 (1) erfüllt, wenn die vertikalen Wandlasten P_{zSk} nach Gleichung (98) zu den symmetrischen Füll- und Entleerungslasten addiert werden. Die symmetrischen Lasten sind für einen Füllstand mit äquivalenter Schüttgutoberfläche entsprechend einer angenommenen symmetrischen Füllung nach 7.3.1.1 zu bestimmen.



Legende

1 Höchstliegende Kontaktstelle des Silowand mit dem Schüttgut

Bild 14 — Fülldrücke bei exzentrisch gefüllten niedrigen Silos oder Silos mit mittlerer Schlankheit

DIN 1055-6:2005-03

(3) Die Auswirkung der unsymmetrischen Lasten kann durch eine Erhöhung der Vertikalkräfte in dem Wandbereich berücksichtigt werden, wo die Füllhöhe am größten ist.

ANMERKUNG Die Erhöhung der Vertikalkräfte ergibt sich aus der globalen Biegung des Silos. Die Biegung resultiert daraus, dass auf der der maximalen Anschüttung gegenüberliegenden Wandseite wegen der dort geringeren Anschütthöhe keine entsprechenden, im Gleichgewicht stehenden Horizontallasten vorhanden sind. Der Zuwachs der Vertikallast ist mit den Wandreibungslasten zu überlagern, die aus den symmetrischen Lastfällen berechnet werden (siehe oben).

(4) Die Berechnungen sind mit dem oberen charakteristischen Wert der Schüttgutkennwerte K und μ durchzuführen.

(5) Der charakteristische Wert der resultierenden zusätzlichen vertikalen Wandlast $P_{zSk}(z_s)$ ist in einer Tiefe z_s unterhalb des höchstliegenden Berührungspunktes des Schüttgutes mit der Wand zu bestimmen aus:

$$P_{zSk} = 0,04 p_{ho} z_s \tan \varphi_r (e_t / r) (6 + 7Z - Z^2) \quad (98)$$

und hat die Einheit Kraft durch Längeneinheit in Umfangsrichtung,

mit:

$$p_{ho} = \frac{\gamma}{\mu} \frac{A}{U} = \frac{\gamma r}{2\mu} \quad (99)$$

$$Z = \frac{z_s}{B} \quad (100)$$

$$B = \frac{r}{2\mu K} - h_o \quad (101)$$

$$h_o = r \tan \varphi_r [1 - (e_t / r)^2] / 3 \quad (102)$$

Dabei ist

z_s die Tiefe unterhalb der höchstliegenden Kontaktstelle des Schüttgutes mit der Wand;

φ_r der Böschungswinkel des Schüttgutes;

r der Radius der kreisförmigen Silowand;

e_t die Exzentrizität der Spitze des Füllanschüttkegels (siehe Bilder 1b und 14).

(6) Der Lastanteil aus Gleichung (98) ist mit dem Lastanteil aus den aufsummierten Wandreibungslasten nach Gleichung (88) zu überlagern.

7.3.4 Große Entleerungsexzentrizitäten in kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit

(1) Bei einer Entleerungsexzentrizität e_o , die größer als der kritische Wert $e_{o,cr} = 0,25d_c$ ist, sind bei niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit ($h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklassen 2 und 3 die Verfahren nach 7.2.4 anzuwenden. Die dort beschriebenen Lasten sind als ein zusätzlicher, getrennt zu den symmetrischen Lasten und Teilflächenlasten (nach 7.3.2) zu behandelnder Lastfall zu betrachten.

7.4 Stützwandsilos

7.4.1 Fülllasten auf vertikale Wände

(1) Die Auswirkung der Geometrie des Anschüttwinkels und – falls erforderlich – der Krümmung der Stützwand ist bei der Ermittlung der Fülllasten zu berücksichtigen.

(2) Bei der Bestimmung des Horizontallastverhältnisses K sollte der Widerstand der Wand gegenüber radialer Ausdehnung berücksichtigt werden. Bei rechnerischem Nachweis ausreichender (elastischer) Verformungen der Stützwand (z. B. positive Grenzwert-Verschiebung nach DIN 4085 bzw. DIN V 4085-100) darf ein niedrigeres Horizontallastverhältnis K angenommen werden.

(3) Es ist ein charakteristischer Wert der Horizontallasten p_h auf die vertikalen Wände (siehe Bild 16) zu bestimmen.

ANMERKUNG 1 Der charakteristische Wert der Horizontallasten p_h auf die vertikalen Wände kann näherungsweise wie folgt bestimmt werden:

$$p_h = \gamma K (1 + \sin \varphi_r) z_s \quad (103)$$

Dabei ist

z_s die Tiefe unterhalb der höchstliegenden Kontaktstelle des Schüttgutes mit der Wand (siehe Bild 16);

γ der obere charakteristische Wert der Schüttgutwichte;

K der obere charakteristische Wert des Horizontallastverhältnisses des Schüttgutes;

φ_r der Böschungswinkel des gespeicherten Schüttgutes.

ANMERKUNG 2 Gleichung (103) liefert für eine gerade vertikale Wand mit voll entwickeltem Wandreibungskontakt und unter der Voraussetzung der Gleichheit von Böschungswinkel und Winkel der inneren Reibung anerkannt realistische Lastansätze.

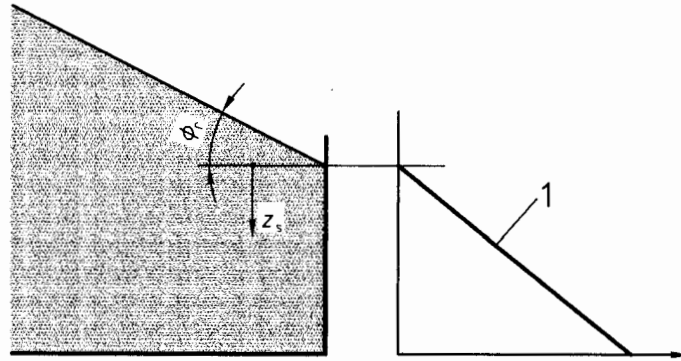
(4) Der charakteristische Wert der resultierenden zusätzlichen vertikalen Wandlast (Druck) $P_{zSk}(z_s)$ – in der Einheit Kraft je Längeneinheit in Umfangsrichtung – in beliebiger Tiefe z_s unterhalb des höchstliegenden Berührungspunktes des Schüttgutes und der Wand ist entsprechend dem Lastansatz nach (3) und unter Berücksichtigung des Wandreibungswinkels μ zu bestimmen.

ANMERKUNG 3 Der charakteristische Wert der resultierenden zusätzlichen vertikalen Wandlast (Druck) $P_{zSk}(z_s)$ kann näherungsweise wie folgt bestimmt werden:

$$P_{zSk} = \gamma \frac{\mu K}{2} (1 + \sin \varphi_r) z_s^2 \quad (104)$$

wobei μ der obere charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten des Schüttgutes ist.

DIN 1055-6:2005-03

**Legende**

- 1 Lastansatz in einem Stützwandsilo

Bild 15 — Fülldrücke in einem Stützwandsilo

(5) Ungeachtet anders lautender Regeln dieser Norm darf die Streuung der Schüttgutparameter bei Stützwandsilos durch die Verwendung der oberen charakteristischen Werte der Wichte γ und des Horizontallastbeiwertes K des Schüttgutes als ausreichend berücksichtigt angenommen werden.

7.4.2 Entleerungslasten auf vertikale Wände

(1) Es kann davon ausgegangen werden, dass die Entleerungslasten auf die vertikalen Wände i. d. R. kleiner sind als die Fülllasten nach 7.4.1.

(2) In Bezug auf 7.4.2 (1) ist zu berücksichtigen, dass als Ergebnis einer ungleichmäßigen Schüttgutentnahme im Silo ungleichmäßig verteilte Lasten auftreten können.

7.5 Silos mit fluidisiertem Schüttgut

7.5.1 Allgemeines

(1) Zusätzliche Lasten aus Fluidisierung und aus Luftdrücken infolge Einblasen von Luft sind bei der Bemessung zu berücksichtigen.

(2) Homogenisierungssilos mit fluidisiertem Schüttgut und Silos mit einer großen Einfüllgeschwindigkeit des Schüttgutes (siehe 3.1.16 und 3.1.17) sind für die beiden Fälle:

- Schüttgut fluidisiert,
- Schüttgut nicht fluidisiert,

zu bemessen.

(3) Für den Fall, dass das Schüttgut nicht fluidisiert, sind die Lasten entsprechend dem Vorgehen nach 7.2 oder 7.3 zu behandeln.

7.5.2 Lasten in Silos zur Lagerung von fluidisiertem Schüttgut

(1) In Silos zur Lagerung von staubförmigem Schüttgut (siehe 3.1.31) ist davon auszugehen, dass das gespeicherte Schüttgut fluidisieren kann, falls die Geschwindigkeit der ansteigenden Schüttgutoberfläche 10 m/h übersteigt.

ANMERKUNG Die Bedingungen, unter denen ein gespeichertes staubförmiges Schüttgut fluidisieren kann, hängen von vielen Faktoren ab, die nicht einfach zu definieren sind. Das oben angeführte Kriterium ist eine einfache Abschätzung der Situation, ob dieser Lastfall für die Bemessung entscheidend werden kann. Wenn immer Zweifel über ein mögliches Fluidisieren des Schüttgutes bestehen, wird das Hinzuziehen von entsprechend spezialisierten Gutachtern (z. B. aus der Schüttgutmechanik) empfohlen.

(2) In Homogenisierungssilos zur Lagerung von staubförmigen Schüttgutern (siehe 3.1.16) im Umlaufbetrieb ist davon auszugehen, dass das gespeicherte Schüttgut fluidisieren kann.

(3) Die Horizontallasten auf die Silowände p_h aus dem fluidisierten Schüttgut lassen sich nach Gleichung (105) berechnen:

$$p_h = \gamma_1 z \quad (105)$$

Dabei ist

γ_1 die Wichte des fluidisierten Schüttgutes (fluidisierte Wichte).

(4) Die Wichte eines Schüttgutes γ_1 im fluidisierten Zustand kann über die Beziehung

$$\gamma_1 = 0,8 \gamma \quad (106)$$

abgeschätzt werden, wobei γ die Schüttgutwichte des staubförmigen Schüttgutes nach Abschnitt 6 ist.

7.6 Temperaturunterschiede zwischen Schüttgut und Silokonstruktion

7.6.1 Allgemeines

(1) Bei der Bemessung einer Silokonstruktion sind die Auswirkungen von Temperaturunterschieden zwischen dem Schüttgut und der Silokonstruktion und/oder zwischen den Umgebungsbedingungen und der Silokonstruktion zu berücksichtigen.

(2) Falls das gelagerte Schüttgut eine unterschiedliche Temperatur gegenüber Teilbereichen oder der gesamten Silowand aufweisen kann, so ist der Silo für die zusätzlichen Lasten aus unterschiedlichen Wärmedehnungen unter der Annahme eines steifen Schüttgutes zu bemessen.

(3) Die Temperaturbedingungen sind entsprechend den Vorgaben von DIN 1055-7 anzusetzen.

(4) Unterschiedliche Temperaturverformungen an dem Silo und den mit dem Silo verbundenen Bauteilen sind zu berücksichtigen.

(5) Folgende Bemessungssituationen sind zu betrachten:

- Abnahme der Umgebungstemperaturen relativ zu den Temperaturen der Silokonstruktion und des gespeicherten Schüttgutes,
- Befüllen des Silos mit heißen Schüttgütern,
- unterschiedliche Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten zwischen ungeschützten und unverkleideten Bauteilen aus Stahl und Stahlbeton,
- Behinderungen von Wandverformungen durch die Silokonstruktion.

ANMERKUNG Unterschiedliches Erwärmen von ungeschützten Bauteilen aus Stahl und Stahlbeton ist typisch für Dachkonstruktionen, bei denen die Dachträger lediglich gleitend (ohne konstruktive Anbindung) auf die Silowände gelagert sind.

DIN 1055-6:2005-03**7.6.2 Lasten infolge einer Abnahme der atmosphärischen Umgebungstemperaturen**

(1) Wenn eine Abnahme der atmosphärischen Umgebungstemperaturen innerhalb einer kurzen Zeitspanne zu erwarten ist, sind zusätzliche Lasten infolge unterschiedlicher Temperaturverformungen der äußeren Struktur und dem thermisch relativ wenig beeinflussten Schüttgutfüllkörper zu berücksichtigen.

(2) Bei Silos mit kreisförmigem Grundriss sind zusätzliche Horizontallasten p_{hT} anzusetzen, die auf die vertikalen Silowände wirken, wenn der Behälter sich im Vergleich zum gespeicherten Schüttgut stärker abkühlt. Die zusätzlichen Lasten an jeder Stelle der Kontaktfläche zwischen Schüttgut und Silowand lassen sich abschätzen zu:

$$p_{hT} = C_T \alpha_w \Delta T \frac{E_w}{[(r/t) + (1-\nu)(E_w/E_{sU})]} \quad (107)$$

Dabei ist

C_T der Lastvergrößerungsfaktor infolge von Temperatur;

α_w der Wärmeausdehnungskoeffizient der Silowand;

ΔT der Temperaturunterschied;

r der Siloradius ($= d_c/2$);

t die Wanddicke;

E_w der Elastizitätsmodul der Silowand;

ν die Poissonzahl des Schüttgutes (näherungsweise mit $\nu = 0,3$ anzusetzen);

E_{sU} der effektive Elastizitätsmodul des Schüttgutes bei Entlastung in der Schüttguttiefe z .

(3) Die Abschätzung des effektiven Elastizitätsmoduls E_{sU} des Schüttgutes bei Entlastung in der Schüttguttiefe z hat die Größe der vertikalen Fülllasten p_{vf} im Schüttgut an dieser Stelle zu berücksichtigen.

(4) Der effektive Elastizitätsmodul E_{sU} des Schüttgutes bei Entlastung ist nach den in C.10 beschriebenen Verfahren zu bestimmen.

(5) Wenn der effektive Elastizitätsmodul E_{sU} des Schüttgutes über Versuche bestimmt wurde, ist ein Lastvergrößerungsfaktor infolge Temperatur von $C_T = 1,2$ anzusetzen. Wird der effektive Elastizitätsmodul näherungsweise aus der Schüttgutdichte hergeleitet, ist ein Lastvergrößerungsfaktor infolge Temperatur von $C_T = 3$ anzusetzen.

7.6.3 Lasten infolge heiß eingefüllter Schüttgüter

(1) Werden Schüttgüter mit hohen Temperaturen in einem Silo eingelagert, ist der Temperaturunterschied zwischen dem abgekühlten, sich bereits längere Zeit im Silo befindlichen Schüttgut und der sich ausbildenden Zone mit hohen Lufttemperaturen oberhalb der Schüttgutoberfläche zu berücksichtigen. Die Auswirkungen dieser Temperaturunterschiede auf das Ausdehnungsverhalten der Silowand sind zu beachten.

(2) Diese Effekte brauchen bei Silos der Anforderungsklasse 1 nicht berücksichtigt zu werden.

7.7 Lasten in rechteckigen Silos

7.7.1 Rechtecksilos

(1) Die Wandlasten infolge von gelagerten Schüttgütern sind in Silos mit rechteckigem Querschnitt je nach Anwendungsfall nach 7.2, 7.3 und 7.4 anzusetzen.

(2) Die nach 7.2 an einer bestimmten Schüttguttiefe ermittelten Lasten sind als Mittelwerte zu betrachten. Die lokal wirkenden Lasten an dieser Stelle können von diesen Mittelwerten abweichen.

(3) Ungeachtet der allgemeinen Erfordernisse von 6.1 (2) kann bei der Bemessung von Silos der Anforderungsklassen 1 und 2 die günstige Wirkung der Interaktion zwischen Schüttgut und Silowand in Form einer Umlagerung der Horizontallasten von der Wandmitte (Abnahme) in die Ecken (Zunahme) berücksichtigt werden, wenn die Silowand so ausgelegt ist, dass deren Steifigkeit mit der Steifigkeit des gelagerten Schüttgutes vergleichbar ist.

(4) Werden Lastumlagerungen nach 7.7.1 (3) in Ansatz gebracht, sind hierfür entsprechende Lastansätze zu verwenden.

7.7.2 Silos mit inneren Zuggliedern

(1) In rechteckigen Silozellen mit innerhalb des Siloquerschnitts verlaufenden Zugbändern sind die Schüttgutlasten auf die Wände je nach Anwendungsfall nach dem Vorgehen in 7.2, 7.3 und 7.4 anzusetzen.

(2) Die Lasten, die von den Zuggliedern auf die Silowände wirken, sind unter Berücksichtigung folgender Einflüsse zu ermitteln:

- Belastung auf die jeweiligen inneren Zugglieder,
- Lage und Befestigung der Zugglieder,
- Durchhang der Zugglieder,
- Einfluss der Bauwerkssteifigkeit auf die Vergrößerung des Durchhanges infolge Schüttgutlasten auf das Zugband.

(3) Bei Silos der Anforderungsklassen 1 und 2 sollten die Lasten auf die Silostruktur infolge der inneren Zugbänder nach den Berechnungsmethoden von DIN V ENV 1993-4-1:2002-05, Abschnitt 9 berücksichtigt werden.

8 Lasten auf Silotrichter und Siloböden

8.1 Allgemeines

8.1.1 Physikalische Kennwerte

(1) Für die folgenden Arten der Ausbildung von Siloböden werden in diesem Abschnitt die zu verwendenden charakteristischen Werte der Füll- und Entleerungslasten angegeben:

- ebene Böden;
- steile Trichter;
- flach geneigte Trichter.

(2) Die Lasten auf die Wände von Silotrichtern sind unter Berücksichtigung der Neigung der Trichterwände entsprechend der folgenden Einteilung zu ermitteln:

DIN 1055-6:2005-03

- Von einem ebenen Boden ist auszugehen, wenn der Neigungswinkel des Bodens gegenüber der Horizontalen α weniger als 5° beträgt.
- Von einem flach geneigten Trichter ist auszugehen, wenn die beiden anderen angeführten Fälle nicht zutreffen.
- Ein steiler Trichter liegt vor, wenn folgendes Kriterium erfüllt (siehe Bilder 17 und 18) ist:

$$\tan \beta < \frac{(1-K)}{2\mu_h} \quad (108)$$

Dabei ist

K der untere charakteristische Wert des Horizontallastverhältnisses an den vertikalen Wänden;

β der Trichterneigungswinkel gemessen in Bezug zur vertikalen Achse (halber Scheitelwinkel);

μ_h der untere charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten im Trichter.

ANMERKUNG Ein steiler Trichter liegt vor, wenn das Schüttgut unter der Bedingungen den geneigten Wänden entlang gleitet, dass der Silo gefüllt ist und sich das Schüttgut infolge des im Silo gelagerten Schüttgutes in einem verdichteten (konsolidierten) Zustand befindet. Der Reibwiderstand an der Trichterwand ist dann über die Normaldrücke auf die Trichterwand und den Wandreibungskoeffizienten definiert. Man spricht in diesem Fall auch von „vollständig mobilisierter Wandreibung“. Ein flach geneigter Trichter liegt vor, wenn das Schüttgut im gefüllten Zustand des Silos nicht entlang der geneigten Trichterwand fließt (der auf die Horizontale bezogene Trichterneigungswinkel ist zu klein bzw. die Wandreibung ist zu hoch). Der Wandreibungswiderstand steht dann nicht in direkter Beziehung zu den auf die Trichterwand wirkenden Normaldrücken und den Wandreibungskoeffizienten, sondern ist etwas geringer und hängt vom Trichterneigungswinkel und vom Spannungszustand im Trichter ab (Wandreibung nicht vollständig mobilisiert). In diesem Zusammenhang spielt zwar auch die Kompressibilität des Schüttgutes eine Rolle, sie kann aber vernachlässigt werden. Beim Übergang von einem steilen in einen flachen Trichter liefern die Druckansätze für die beiden Trichtertypen die gleichen Druckverteilungen und Druckwerte. Der Übergang von einem steilen in einen flachen Trichter erfolgt somit gleichmäßig (Neigungswinkel, bei dem die Wandreibung gerade voll mobilisiert ist).

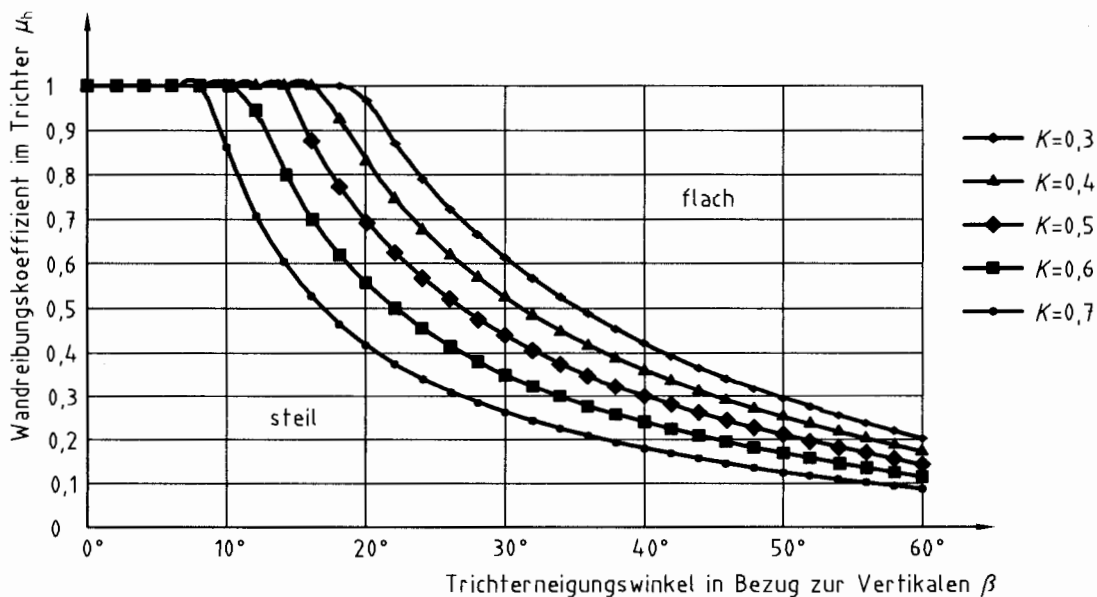


Bild 16 — Grenze zwischen steilem und flachem Trichter

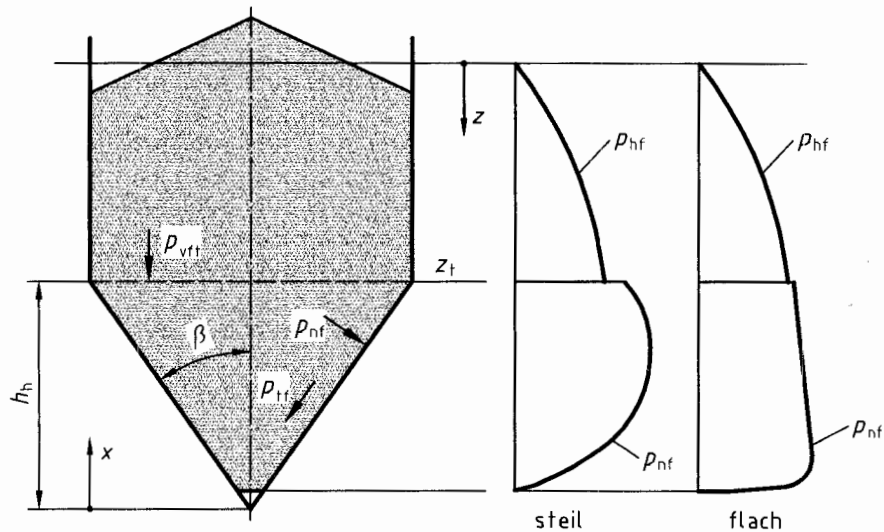


Bild 17 — Verteilung der Fülldrücke in einem steilen und flachen Trichter

8.1.2 Allgemeine Regelungen

(1) Die mittleren Vertikallasten am Trichterübergang und auf einem waagerechten Boden sind zu berechnen mit:

$$\rho_{vft} = C_b \rho_{vf} \quad (109)$$

Dabei ist

ρ_{vf} die vertikale Fülllast nach den Gleichungen (11) oder (86) je nach Schlankheit des Silos. Dabei sind als Koordinate z die Höhe der vertikalen Wand h_c (d. h. am Trichterübergang nach Bild 1a) und die Schüttgutkennwerte anzusetzen, die zu den maximalen Trichterlasten nach Tabelle 2 führen;

C_b der Bodenlastvergrößerungsfaktor zur Berücksichtigung der Möglichkeit, dass infolge der Überschüttung des Trichters durch das Schüttgut im vertikalen Siloschaft größere Vertikallasten als nach Gleichungen (11) oder (86) auf den Trichter und Siloboden übertragen werden können.

(2) Bei Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 ist der Bodenlastvergrößerungsfaktor nach Gleichung (110) anzusetzen:

$$C_b = 1,0 \quad \text{außer unter den in Absatz (4) beschriebenen Bedingungen} \quad (110)$$

(3) Wenn bei Silos der Anforderungsklasse 1 die Mittelwerte der Materialkennwerte K und μ bei der Lastermittlung verwendet werden, ist der Bodenlastvergrößerungsfaktor nach Gleichung (111) anzusetzen:

$$C_b = 1,3 \quad \text{außer unter den in Absatz (4) beschriebenen Bedingungen} \quad (111)$$

(4) Von einer Neigung zu dynamischem Verhalten (Bedingungen von Absatz (4)) sollte insbesondere bei Vorliegen folgender Fälle ausgegangen werden:

- in einem Silo mit einem schlanken vertikalen Siloschaft bei Lagerung von Schüttgütern, die nicht der Klasse von Schüttgütern mit geringer Kohäsion zugeordnet werden können (siehe 3.1.23),
- wenn das gelagerte Schüttgut zur mechanischen Verzahnung der Schüttgutpartikel untereinander und zur Brückenbildung (z. B. Zementklinker) neigt,

DIN 1055-6:2005-03

- oder aus anderen als den genannten Gründen zu stoßartigen Belastungen beim Entleeren neigt (z. B. Pulsieren, Schlagen).

ANMERKUNG 1 Die Bestimmung der Kohäsion c eines Schüttgutes ist in C.9 beschrieben. Die Kohäsion c wird als gering eingestuft, wenn sie nach einer Verdichtung des Schüttgutes unter dem Spannungsniveau σ_r den Wert $c/\sigma_r = 0,04$ nicht übersteigt (siehe 3.1.23).

(5) Wenn das gelagerte Schüttgut beim Entleeren des Silos eine signifikante Neigung zu dynamischem Verhalten aufweist (siehe Absatz (4)), sind größere Lasten auf den Trichter und Siloboden anzusetzen. Der Bodenlasterhöhungsfaktor ist dann anzusetzen mit:

$$C_b = 1,2 \quad \text{für die Anforderungsklassen 2 und 3} \quad (112)$$

$$C_b = 1,6 \quad \text{für die Anforderungsklasse 1} \quad (113)$$

ANMERKUNG 2 Die Lasten auf die Trichterwände können alternativ nach den in Anhang H beschriebenen Verfahren angesetzt werden.

ANMERKUNG 3 Die erhöhten Werte für C_b nach Gleichung (113) müssen nur dann verwendet werden, wenn in der Anforderungsklasse 1 die vereinfachten Verfahren zur Lastermittlung mit den Mittelwerten der charakteristischen Schüttgutkennwerten verwendet wurden.

(6) Für jede Lastsituation ist die mittlere Vertikallast im Trichter in einer Höhe x oberhalb des (theoretischen) Trichterscheitels (siehe Bild 18) zu bestimmen als:

$$p_v = \left(\frac{\gamma h_h}{n-1} \right) \left\{ \left(\frac{x}{h_h} \right) - \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \right\} + p_{vft} \left(\frac{x}{h_h} \right) \quad (114)$$

mit:

$$n = S (F \mu_{\text{heff}} \cot \beta + F) - 2 \quad (115)$$

und

$$S = 2 \quad \text{für konische und quadratische pyramidenförmige Trichter} \quad (116)$$

$$S = 1 \quad \text{für keilförmige Trichter} \quad (117)$$

$$S = (1 + b/a) \quad \text{für Trichter mit rechteckigem Grundriss} \quad (118)$$

Dabei ist

γ der obere charakteristische Wert der Schüttgutwichte;

h_h der vertikale Abstand (Höhe) zwischen Trichterscheitel und Übergang in den vertikalen Schaft (siehe Bild 18);

x die vertikale Koordinate ausgehend vom Trichterscheitel (siehe Bild 18);

μ_{heff} der effektive oder mobilisierte charakteristische Wandreibungskoeffizient für den Trichter (je nach Fall Gleichung (122) oder (132));

S der Koeffizient zur Berücksichtigung der Trichterform;

- F der charakteristische Wert des Lastverhältnisses im Trichter (je nach Fall Gleichungen (123), (127) oder (133));
- β der Trichterneigungswinkel bezogen auf die Vertikale ($= 90^\circ - \alpha$) oder der steilste Winkel bezogen auf die Vertikale im Falle eines quadratischen oder rechteckigen pyramidenartigen Trichters;
- p_{vft} die mittlere Vertikallast im Schüttgut am Trichterübergang des Lastfalls Füllen (Gleichung (109));
- a Länge der langen Seite eines rechteckigen Trichterquerschnittes;
- b Länge der kurzen Seite eines rechteckigen Trichterquerschnittes.

(7) Bei der Ermittlung des Lastverhältnisses F im Trichter ist zu berücksichtigen, ob der Trichter als steil oder als flach einzustufen ist und ob der Lastfall Füllen oder Entleeren betrachtet wird. Geeignete Werte für F sind nach 8.3 und 8.4 zu bestimmen.

(8) Die Bestimmung eines geeigneten Wertes für den effektiven oder mobilisierten Wandreibungskoeffizienten μ_{heff} im Trichter hat zu berücksichtigen, ob der Trichter als steil oder als flach einzustufen ist oder ob der Lastfall Füllen oder Entleeren betrachtet wird. Geeignete Werte sind nach 8.3 und 8.4 zu bestimmen.

8.2 Waagerechte Siloböden

8.2.1 Vertikallasten auf waagerechte Siloböden in schlanken Silos

(1) Die Vertikallasten auf waagerechte Siloböden (Neigung $\alpha \leq 5^\circ$) können näherungsweise als konstant angenommen werden, außer wenn der Silo als niedrig und mittelschlank einzustufen ist. In diesen Fällen sind die Festlegungen nach 8.2.2 anzuwenden.

(2) Die Vertikallasten auf waagerechte Böden sind zu berechnen mit:

$$p_v = p_{vft} \quad (118)$$

wobei p_{vft} nach Gleichung (109) zu berechnen ist.

(3) Die Vertikallasten auf waagerechte Siloböden sind für den Lastfall Entleeren mit den Lasten des Lastfalles Füllen gleichzusetzen.

8.2.2 Vertikallasten auf ebene Siloböden in niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit

(1) Bei niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit ist zu beachten, dass bei waagerechten Siloböden lokal größere Bodenlasten als die nach 8.1.2 (Gleichung (109)) auftreten können.

(2) Die Vertikallasten p_{vsq} auf den waagerechten Siloböden eines niedrigen Silos und eines Silos mit mittlerer Schlankheit sind zu bestimmen mit:

$$p_{vsq} = p_{vb} + \Delta p_{sq} \left(\frac{2,0 - h_c / d_c}{2,0 - h_{tp} / d_c} \right) \quad (119)$$

mit:

$$\Delta p_{sq} = p_{vtp} - p_{vho} \quad (120)$$

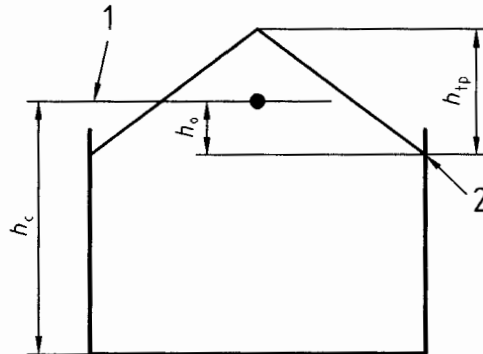
$$p_{vtp} = \gamma h_{tp} \quad (121)$$

DIN 1055-6:2005-03

Dabei ist

- p_{vb} der konstante vertikale Lastanteil nach Gleichung (109) mit $z = h_c$ und unter Verwendung der charakteristischen Schüttgutkennwerte, die zu den maximalen Trichterlasten nach Tabelle 2 führen;
- p_{vho} der Vertikallastanteil nach Janssen am unteren Ende des oberen Anschüttkegels nach der Gleichung (86) mit $z = h_o$;
- h_o der vertikale Abstand zwischen äquivalenter Schüttgutoberfläche und der am tiefsten liegenden Stelle der Wand, die sich nicht in Kontakt mit dem Schüttgut befindet (siehe Bild 19);
- h_{tp} der vertikale Abstand zwischen der Spitze des Schüttkegels und der am tiefsten liegenden Stelle der Wand, die sich nicht in Kontakt mit dem Schüttgut befindet (siehe Bild 19);
- h_c der vertikale Abstand der äquivalenten Schüttgutoberfläche zum Siloboden (siehe Bild 18);
- d_c der charakteristische Abmessung für den inneren Siloquerschnitt (siehe Bild 1d).

ANMERKUNG Die oben angeführte Regel stellt einen linearen Übergang vom Bodendruck nach der Janssen-Gleichung für einen gerade noch als schlank einzustufenden Silo ($h_c/d_c = 2,0$) zu dem nach der Geostatik ermittelten vertikalen Druckniveau γz ($z = h_o$) unter der Bedingung sicher, dass das Schüttgut im Silo ausschließlich aus einem Schüttkegel ($h_c = h_o$) besteht, und somit keine Bereiche mit Kontakt zur Silowand existieren. Der letztgenannte Ansatz der Geostatik liefert größere Lasten, als sie sich unterhalb eines Schüttkegels maximal einstellen. Er stellt damit eine einfache konservative Abschätzung dar.

**Legende**

- 1 Äquivalente Schüttgutoberfläche
- 2 Niedrigster Punkt der Wand ohne Kontakt mit dem Schüttgut

Bild 18 — Bodenlasten in niedrigen Silos und in Silos mit mittlerer Schlankheit

(3) Die Bodenlasten p_{vsq} nach Gleichung (119) können sowohl für den Lastfall Füllen als auch für den Lastfall Entleeren angesetzt werden.

(4) Der Wert von p_{vsq} nach Gleichung (119) gibt die Vertikallast in der Nähe des Mittelpunkts des Silobodens wieder. Wenn keine gleichmäßige Unterstützung der Bodenplatte sichergestellt ist, ist eine zweckmäßige Verteilung der Bodenlasten anzusetzen.

8.3 Steiler Trichter

8.3.1 Mobilisierte Reibung

(1) Sowohl für den Lastfall Füllen als auch den Lastfall Entleeren ist für den effektiven bzw. mobilisierten Wandreibungskoeffizient in Gleichung (115) folgender Wert anzusetzen:

$$\mu_{\text{heff}} = \mu_h \quad (122)$$

wobei

μ_h der untere charakteristische Wert des Wandreibungswinkels im Trichter ist.

8.3.2 Fülllasten

(1) Im Lastfall Füllen ist die mittlere Vertikalspannung an beliebiger Stelle x eines steilen Trichters nach den Gleichungen (114) und (115) sowie dem Parameter F_f nach Gleichung (123) zu berechnen:

$$F_f = 1 - \frac{b}{\left(1 + \frac{\tan \beta}{\mu_h}\right)} \quad (123)$$

Der Parameter n in Gleichung (114) beträgt in diesem Fall:

$$n = S(1 - b) \mu_h \cot \beta \quad (124)$$

wobei

b einen empirischen Koeffizienten darstellt, der zu $b = 0,2$ anzunehmen ist.

Die anderen Parameter sind in 8.1.2 (6) definiert.

(2) Die Lasten senkrecht auf die Trichterwände p_{nf} und die Wandreibungslasten p_{tf} an beliebiger Stelle x der Wand eines steilen Trichters sind für den Lastfall Füllen (siehe Bild 17) nach den Gleichungen (125) und (126) zu berechnen:

$$p_{nf} = F_f p_v \quad (125)$$

$$p_{tf} = \mu_h F_f p_v \quad (126)$$

wobei F_f über die Gleichung (123) zu berechnen ist.

8.3.3 Entleerungslasten

(1) Im Lastfall Entleeren ist die mittlere Vertikalspannung an beliebiger Stelle x eines steilen Trichters nach den Gleichungen (114) und (115) unter Verwendung des Parameters F_e zu berechnen mit

$$F_e = \frac{1 + \sin \varphi_1 \cos \varepsilon}{1 - \sin \varphi_1 \cos(2\beta + \varepsilon)} \quad (127)$$

mit:

$$\varepsilon = \varphi_{wh} + \arcsin \left\{ \frac{\sin \varphi_{wh}}{\sin \varphi_1} \right\} \quad (128)$$

$$\varphi_{wh} = \arctan \mu_h \quad (129)$$

DIN 1055-6:2005-03

Dabei ist

μ_h der untere charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten des Trichters;

φ_i der obere charakteristische Wert des Winkels der inneren Reibung des im Trichter gelagerten Schüttgutes.

ANMERKUNG 1 Es ist zu beachten, dass der Wandreibungswinkel des Trichters immer kleiner oder gleich dem Winkel der inneren Reibung des im Trichter gelagerten Schüttgutes ist (d. h. $\varphi_{wh} \leq \varphi_i$), da sich sonst innerhalb des Schüttgutes eine Gleitfläche ausbildet, wenn an der Wandkontaktfläche größere Schubspannungen aufnehmbar sind, als durch die innere Reibung des Schüttgutes.

ANMERKUNG 2 Die obige Gleichung (127) für F_e basiert auf der einfachen Theorie von Walker für Entleerungsdrücke in Trichtern. Es ist auch möglich, den alternativen Ausdruck für F_e von Enstad zu verwenden, der in H.11 angeführt ist.

(2) Die Lasten senkrecht auf die Trichterwände p_{ne} und die Wandreibungslasten p_{te} sind an jeder Stelle x der Wand eines steilen Trichters für den Lastfall Entleeren (siehe Bild 20) nach den Gleichungen (130) und (131) zu berechnen:

$$p_{ne} = F_e p_v \quad (130)$$

$$p_{te} = \mu_h F_e p_v \quad (131)$$

wobei F_e über Gleichung (127) zu berechnen ist.

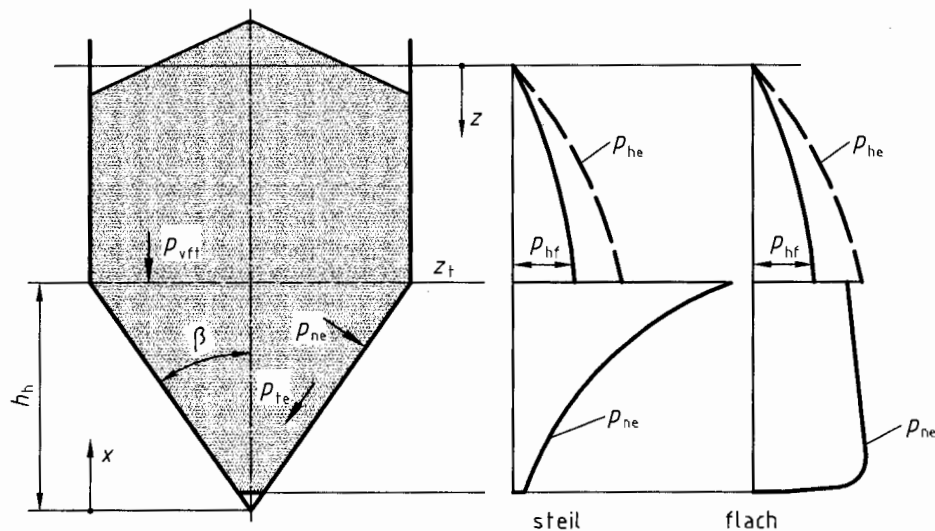


Bild 19 — Entleerungsdrücke in einem steilen und einem flach geneigten Trichter

8.4 Flacher Trichter

8.4.1 Mobilisierte Reibung

In einem flach geneigten Trichter wird die Wandreibung nicht voll mobilisiert. Der teilweise mobilisierte oder effektive Wandreibungskoeffizient ist anzusetzen als:

$$\mu_{\text{heff}} = \frac{(1-K)}{2 \tan \beta} \quad (132)$$

Dabei ist

K der untere charakteristische Wert des Horizontallastverhältnisses im vertikalen Siloschaft, der zu den maximalen Trichterlasten führt (siehe Tabelle 2);

β der Trichterneigungswinkel bezogen auf die vertikale Achse (siehe Bild 18).

8.4.2 Fülllasten

(1) Im Lastfall Füllen ist die mittlere Vertikalspannung in jeder Schüttguttiefe eines flachen Trichters nach den Gleichungen (114) und (115) unter Verwendung des Parameters F_f zu berechnen mit

$$F_f = 1 - \{b / (1 + \tan\beta / \mu_{\text{heff}})\} \quad (133)$$

Der Parameter n in Gleichung (114) beträgt in diesem Fall:

$$n = S(1 - b) \mu_{\text{heff}} \cot\beta \quad (134)$$

Dabei ist

μ_{heff} der mobilisierte oder effektive Wandreibungskoeffizient in einem flachen Trichter nach Gleichung (132);

b ein empirischer Koeffizient, der zu $b = 0,2$ anzunehmen ist.

Die anderen Parameter sind in 8.1 definiert.

(2) Die Lasten senkrecht auf die Trichterwände p_{nf} und die Wandreibungslasten p_{tf} sind an beliebiger Stelle x der Wand eines flachen Trichters für den Lastfall Füllen (siehe Bild 18) nach den Gleichungen (135) und (136) zu berechnen:

$$p_{nf} = F_f \rho_v \quad (135)$$

$$p_{tf} = \mu_{\text{heff}} F_f \rho_v \quad (136)$$

wobei

F_f nach Gleichung (132) zu ermitteln ist.

8.4.3 Entleerungslasten

In flachen Trichtern können die Entleerungslasten senkrecht auf die Trichterwände p_{ne} und die Wandreibungslasten p_{te} (siehe Bild 20) wie im Lastfall Füllen berechnet werden (siehe 8.4.2).

8.5 Trichterlasten in Silos mit Lufteinblasevorrichtungen

(1) Bei Trichtern, in denen infolge der Verwendung von Lufteinblasevorrichtungen ein Fluidisieren des Schüttgutes in Teilbereichen oder im gesamten Trichter nicht ausgeschlossen werden kann, sind zusätzliche Lasten infolge des Fluidisierens und die Luftdrücke zu berücksichtigen.

(2) Diese Lasten sollten wie unter 7.5.2 beschrieben ohne einen Ansatz von Wandreibungslasten ermittelt werden.

DIN 1055-6:2005-03**9 Lasten auf Flüssigkeitsbehälter****9.1 Allgemeines**

Die folgenden Regeln zur Bestimmung der charakteristischen Lasten infolge von in Behältern gelagerten Flüssigkeiten sind anzuwenden.

ANMERKUNG 1 Diese Regeln gelten unter statischen Bedingungen für alle Arten von Flüssigkeitsbehältern. Flüssigkeitsbehälter, in denen sich dynamische Vorgänge abspielen, sind nicht einbezogen.

ANMERKUNG 2 Eine Liste von relevanten Einwirkungen, Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationen von Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter können Anhang B entnommen werden.

9.2 Lasten infolge gelagerter Flüssigkeiten

(1) Lasten aus gelagerten Flüssigkeiten sind unter Berücksichtigung folgender Gesichtspunkte zu berechnen:

- der definierten Bandbreite der Flüssigkeiten, die im Flüssigkeitsbehälter gelagert werden sollen;
- der Geometrie des Flüssigkeitsbehälters;
- der maximal möglichen Einfüllhöhe im Flüssigkeitsbehälter.

(2) Der charakteristische Wert der Last p ist nach Gleichung (137) zu berechnen:

$$p(z) = \gamma z \quad (137)$$

Dabei ist

- z die Tiefe unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche;
- γ die Wichte der gelagerten Flüssigkeit.

9.3 Kennwerte der Flüssigkeiten

Es sind die in DIN 1055-1 angegebenen Wichten zu verwenden.

9.4 Soglasten infolge von unzureichender Belüftung

Wenn das Belüftungssystem eines Flüssigkeitsbehälters störungsanfällig ist, ist eine geeignete Berechnungsmethode anzuwenden, um die während der Entleerung unter Extrembedingungen auftretenden Unterdrücke zu bestimmen. Die Berechnung hat die möglichen adiabatischen Eigenschaften des beschriebenen Prozesses zu berücksichtigen.

Anhang A (informativ)

Grundlagen der Tragwerksplanung – Regeln in Ergänzung zu DIN 1055-100 für Silos und Flüssigkeitsbehälter

A.1 Allgemeines

(1) Grundsätzlich ist für die Bemessungsverfahren das in DIN 1055-100 vorgegebene Format anwendbar. Silos und Flüssigkeitsbehälter weisen jedoch gegenüber vielen anderen Gebäuden den wesentlichen Unterschied auf, dass sie die meiste Zeit ihrer Nutzungsdauer den vollen Lasten aus den gelagerten Schüttgütern und Flüssigkeiten ausgesetzt sind und diese in der Regel ein Vielfaches der ständigen Lasten infolge Eigengewicht der Konstruktion betragen.

(2) Dieser Anhang liefert zusätzliche Regeln für die Teilsicherheitsfaktoren der Einwirkungen (γ_F -Beiwerte) und der Kombinationen mit anderen Einwirkungen sowie für die relevanten Kombinationsbeiwerte (ψ -Beiwerte) für Silos und Flüssigkeitsbehälter.

(3) Die möglichen Temperatureinwirkungen schließen klimatische Wirkungen und Wirkungen aus heißem Schüttgut ein. Die folgenden Bemessungssituationen müssen berücksichtigt werden:

- Heiße Schüttgüter, die in teilgefüllte Silos oder Behälter eingefüllt werden. Hierbei sind die Auswirkungen der Erhöhung der Lufttemperatur oberhalb des Schüttgutes zu beachten.
- Verformungsbehinderung der Silowandkonstruktion durch das Schüttgut beim Abkühlen.

(4) Bei der Ermittlung der Auswirkung unterschiedlicher Setzungen in Silobatterien oder Gruppierungen von Silozellen oder Flüssigkeitsbehältern ist von der ungünstigsten Kombination von gefüllten und leeren Zellen auszugehen.

A.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit

A.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte γ

(1) Für die Bemessung von Silos und Flüssigkeitsbehältern können die Werte nach DIN 1055-100:2001-03, Tabelle 6 angesetzt werden.

(2) Wenn die maximale Füllhöhe und die größten anzusetzenden Wichten der zur Lagerung vorgesehenen Flüssigkeiten nicht überschritten werden können, darf der Sicherheitsbeiwert γ_Q von 1,50 auf 1,35 reduziert werden.

A.2.2 Kombinationsbeiwerte ψ

Die Kombinationsbeiwerte ψ für Silolasten und Lasten in Flüssigkeitsbehältern und die Kombinationsbeiwerte mit anderen Einwirkungen werden in der Tabelle A.1 angegeben.

A.3 Einwirkungskombinationen

Beim Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit eines Silos sind folgende Einwirkungen zu betrachten:

DIN 1055-6:2005-03

- Füllen und Lagern von Schüttgütern;
- Entleeren von Schüttgütern;
- Eigen- und Nutzlasten (DIN 1055-3);
- Schnee- und Eislasten (DIN 1055-5);
- Windeinwirkungen, sowohl bei gefülltem als auch bei leerem Silo (DIN 1055-4);
- Temperatureinwirkungen (DIN 1055-7);
- Zwangsverformungen (eingeprägte Verformungen): Setzungen im Gründungsbereich;
- Erdbeben (DIN 4149);
- Staubexplosion (siehe DIN-Fachbericht über Staubexplosionen¹⁾).

A.4 Bemessungssituation und Einwirkungskombinationen für die Anforderungsklassen 2 und 3

(1) Die vorherrschenden (dominierenden) und die ständigen Einwirkungen sind in jedem Lastfall mit ihren vollen Werten anzusetzen, während die begleitenden Einwirkungen durch die Kombinationsbeiwerte ψ reduziert werden können, um der geringeren Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Auftretens in Übereinstimmung mit DIN 1055-100 Rechnung zu tragen. Als Anhaltswerte können die Kombinationen der Tabelle A.1 verwendet werden.

(2) Handelt es sich bei den dominierenden Einwirkungen um Erdbeben- oder außergewöhnliche Lasteinwirkungen, kann unter der Voraussetzung, dass die geeigneten Verfahren von 7.1, 7.3 und 8.1 angewendet werden, die begleitende Einwirkung der Schüttgutlasten mit den Mittelwerten des Wandreibungskoeffizienten μ_m , des Horizontallastverhältnisses K_m und des Trichterlastverhältnisses F_m berechnet werden.

1) In Vorbereitung.

Tabelle A.1 – Kombinationsbeiwerte ψ

Einwirkung	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Schüttgutfüllung, Schüttgutentleerung	1,0	0,9	0,8
Nutzlasten, eingeprägte Verformungen	0,7	0,5	0,3
Schnee- und Eislasten			
Orte bis zu NN + 1 000 m	0,5	0,2	0
Orte über NN + 1 000 m	0,7	0,5	0,2
Windlasten	0,6	0,5	0
Temperatureinwirkungen (nicht Brand) ^a	0,6	0,5	0
Baugrundsetzungen	1,0	1,0	1,0
Sonstige Einwirkungen ^b	0,8	0,7	0,5
^a Siehe DIN 1055-7.			
^b ψ -Beiwerte für Flüssigkeitsdruck sind standortbedingt festzulegen.			

A.5 Einwirkungskombinationen für die Anforderungsklasse 1

Für Silos der Anforderungsklasse 1 können die folgenden vereinfachten Bemessungssituationen verwendet werden:

- Füllen;
- Entleeren;
- Wind bei leerem Silo;
- Silo voll gefüllt und Wind;
- Schnee (für das Dach);
- Staubexplosion.

Beim Lastfall Wind ist die Anwendung der vereinfachten Regeln von DIN 1055-4 erlaubt.

Anhang B (normativ)

Einwirkungen, Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationsbeiwerte der Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter

B.1 Allgemeines

- (1) Die Bemessung hat die charakteristischen Werte der Einwirkungen der Zusammenstellung B.2.1 bis B.2.14 zu berücksichtigen.
- (2) Auf diese charakteristischen Werte sind die Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen nach B.3 und die Kombinationsregeln nach B.4 anzuwenden.

B.2 Einwirkungen

B.2.1 Lasten aus gelagerten Flüssigkeiten

- (1) Während des Betriebs sind als Lasten infolge der Befüllung die Eigengewichtslasten des eingefüllten Produkts vom maximalen Füllstand bis zum völlig entleerten Zustand anzusetzen.
- (2) Während der Probefüllung sind als Lasten infolge der Befüllung die Eigengewichtslasten des bei der Probefüllung eingefüllten Mediums vom maximalen Füllstand bis zum völlig entleerten Zustand anzusetzen.

B.2.2 Lasten aus Innendrücken

- (1) Während des Betriebs sind unter „Lasten aus Innendruck“ die Lasten in Bezug auf die spezifischen Minimal- und Maximalwerte der Innendrücke zu verstehen.
- (2) Während der Probefüllung sind unter „Lasten aus Innendruck“ die Lasten in Bezug auf die spezifischen Minimal- und Maximalwerte der Innendrücke während der Probefüllung zu verstehen.

B.2.3 Lasten aus Temperatur(-änderung)

Spannungen aus Zwängungen infolge von Temperaturdehnungen können vernachlässigt werden, wenn die Anzahl der Lastzyklen der Temperaturdehnungen zu keinem Risiko einer Ermüdung oder eines zyklischen plastischen Versagens führt.

B.2.4 Eigenlasten

- (1) Als Eigenlast von Flüssigkeitsbehältern ist die Resultierende der Eigengewichte aller Einzelbauteile des Behälters und der an diesen befestigten Komponenten anzusetzen.
- (2) Rechenwerte sind aus DIN 1055-1 zu entnehmen.

B.2.5 Lasten aus Dämmung

- (1) Als Lasten infolge von Dämmungen sind die Eigengewichte der Dämmungen anzusetzen.
- (2) Rechenwerte sind aus DIN 1055-1 zu entnehmen.

B.2.6 Verteilte Nutzlasten

Die verteilt anzusetzenden Lasten aus der Nutzung (Verkehr/Betrieb) sind aus DIN 1055-3 zu entnehmen, außer sie werden vom Auftraggeber spezifiziert.

B.2.7 Konzentrierte Nutzlasten

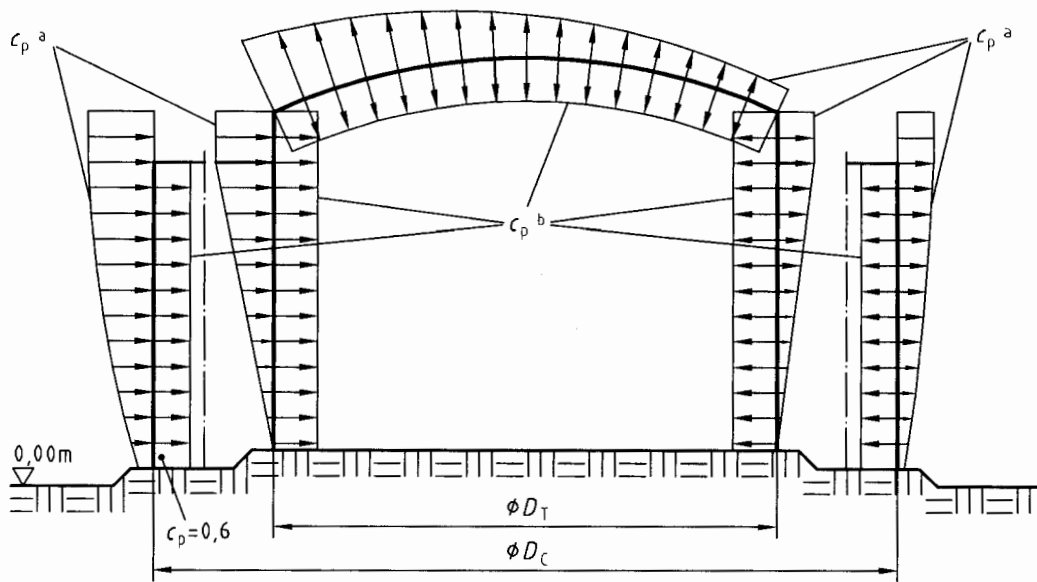
Konzentrierte Einzellasten aus der Nutzung (Verkehr/Betrieb) sind aus DIN 1055-3 zu entnehmen, außer sie werden vom Auftraggeber spezifiziert.

B.2.8 Schnee

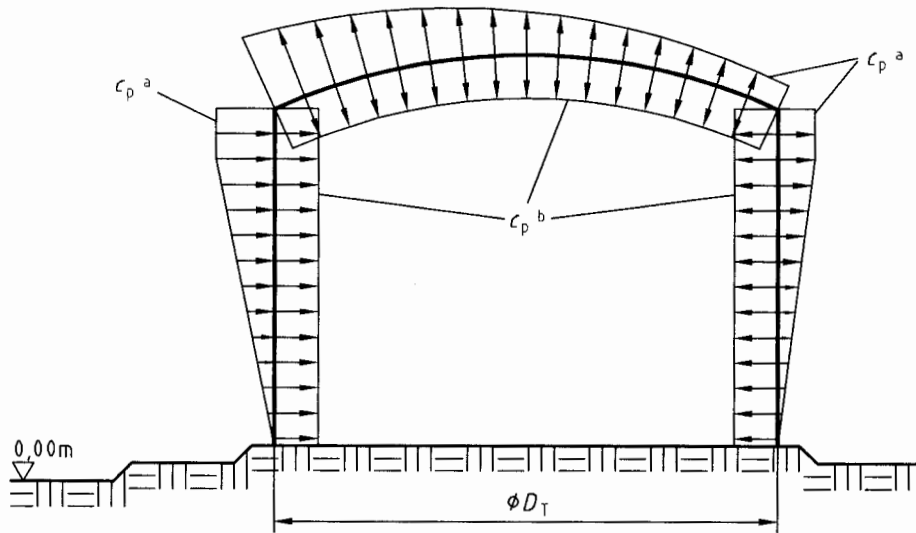
Die Schneelasten sind aus DIN 1055-5 zu entnehmen.

B.2.9 Wind

- (1) Die Lasten aus Wind sind aus DIN 1055-4 zu entnehmen.
- (2) Zusätzlich können die folgenden Druckkoeffizienten für kreisförmige zylindrische Flüssigkeitsbehälter angenommen werden (siehe Bild B.1):
 - a) Innendruck bei oben offenen Flüssigkeitsbehältern und oben offenen Auffangbehältern: $c_p = -0,6$.
 - b) Innendruck bei belüfteten Flüssigkeitsbehältern mit kleinen Öffnungen: $c_p = -0,4$.
 - c) Wenn ein Auffangbehälter vorhanden ist, kann der außen auf den Flüssigkeitsbehälter wirkende Druck als mit der Höhe linear von oben nach unten abnehmend angesetzt werden.
- (3) Entsprechend ihrem temporären Charakter können während der Bauphase reduzierte Windlasten entsprechend E DIN 1055-4 und DIN 1055-8 angesetzt werden.



a) Flüssigkeitsbehälter mit Auffangwanne



b) Flüssigkeitsbehälter ohne Auffangwanne

Legende:

- a c_p nach DIN 1055-4
- b $c_p = 0,4$ bei Belüftung

Bild B.1 — Druckkoeffizienten für Windlasten bei kreisförmigen zylindrischen Flüssigkeitsbehältern

B.2.10 Unterdruck durch unzureichende Belüftung

Die Lasten infolge einer unzureichenden Belüftung sind nach 9.4 anzusetzen.

B.2.11 Seismische Lasten

Seismische Lasten sind nach DIN 4149 anzusetzen.

B.2.12 Lasten aus Verbindungsbauten

Lasten aus Rohrleitungen, Klappen oder anderen Gegenständen und Lasten die aus Setzungen von relativ zu der Gründung des Flüssigkeitsbehälters unabhängigen Gebäudegründungen resultieren, sind zu berücksichtigen. Rohrleitungsanlagen sind so zu konstruieren, dass nur so wenig wie möglich Lasten auf die Flüssigkeitsbehälter wirken.

B.2.13 Lasten aus ungleichförmigen Setzungen

Lasten aus Setzungen sind zu berücksichtigen, wenn im Zeitraum der vorgesehenen Nutzung das Auftreten von ungleichmäßigen Setzungen zu erwarten ist.

B.2.14 Katastrophenlasten

Unter diesen Lasten sind Ereignisse wie äußere Druckwellen, Stoßbeanspruchung, Brandbeaufschlagung, Explosion, Undichtigkeiten des inneren Flüssigkeitsbehälters, Überschwappen und Überfüllung des inneren Tanks zu verstehen.

B.3 Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen

- (1) Auf die Einwirkungen von B.2.2 bis B.2.14 sind die Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN 1055-100 anzuwenden.
- (2) Es wird empfohlen, den Teilsicherheitsbeiwert für Lasten aus Flüssigkeiten für den Betrieb (B.2.1 (1)) mit $\gamma_F = 1,20$ anzusetzen.
- (3) Es wird empfohlen, den Teilsicherheitsbeiwert für Lasten aus Flüssigkeiten während der Probebefüllung (B.2.1 (2)) mit $\gamma_F = 1,00$ anzusetzen.
- (4) Bei Bemessungssituationen für außergewöhnliche Einwirkungen wird empfohlen, für variable Einwirkungen den Teilsicherheitsbeiwert mit $\gamma_F = 1,00$ anzusetzen.

B.4 Kombinationen von Einwirkungen

- (1) Es ist den allgemeinen Anforderungen von DIN 1055-100:2001-03, 9.4 zu folgen.
- (2) Nutzlasten und Lasten aus Schnee müssen nicht als gleichzeitig wirkend angesetzt werden.
- (3) Seismische Einwirkungen müssen während der Probebefüllung nicht betrachtet werden.
- (4) Katastropheneinwirkungen müssen während der Probebefüllung nicht betrachtet werden. Es sind aber die Kombinationsregeln für außergewöhnliche Lasten nach DIN 1055-100:2001-03, 10.4 zu berücksichtigen.

Anhang C (normativ)

Messung von Schüttgutkennwerten für die Ermittlung von Silolasten

C.1 Allgemeines

(1) Dieser Anhang beschreibt Prüfverfahren, die in dieser Norm ausschließlich zur Ermittlung von Schüttgutkennwerten für die Ermittlung der Lasten in Silos eingeführt werden. Diese Verfahren sind nicht für die Auslegung von Silos hinsichtlich der Sicherstellung eines zuverlässigen Schüttgutfließens anwendbar. Das der Ermittlung der Schüttgutkennwerte zugrunde zu legende Druckniveau ist bei der Bestimmung der Schüttgutlasten viel höher anzusetzen als bei den schüttgutmechanischen Betrachtungen zum Schüttgutfließen, weil die untersuchte Schüttgutprobe den maßgeblichen Bedingungen in den Schüttgutbereichen mit hohen Drücken genügen muss. Daraus folgt, dass die Probenvorbereitung in einigen prinzipiellen Vorgehensweisen von der in der Schüttgutmechanik üblichen abweichen muss.

(2) Bei den Vorbereitungen der Probe zur Erzielung einer repräsentativen Schüttgutpackung sind hohe Lagerungsdichten anzuwenden. Alle Parameter, die die Silolasten beeinflussen, sind unter dieser Bedingung zu ermitteln, weil diese Bedingung der hohen Lagerungsdichte den Referenzzustand für die oberen charakteristischen Werte der Einwirkungen auf die Silostruktur beschreibt.

C.2 Anwendung

(1) Die in diesem Anhang beschriebenen Prüfverfahren sind bei der Berechnung der Lasten von Silos der Anforderungsklasse 3 und bei Schüttgütern anzuwenden, die nicht in Tabelle E.1 enthalten sind. Sie können auch zur Ermittlung der Schüttgutkennwerte als Alternative zu den in Tabelle E.1 angegebenen Werten herangezogen werden. Die Bezugsspannungen in den Versuchen wirken entweder in vertikaler oder in horizontaler Richtung. Sie haben repräsentative Spannungsniveaus wiederzugeben, wie sie im gespeicherten Schüttgut z. B. im Bereich des Trichterübergangs beim Lastfall Füllen vorherrschen.

(2) Die Prüfverfahren können auch zur Messung von allgemein gültigen Schüttgutkennwerten zur Berechnung der Lasten von Silos angewendet werden, also nicht nur für eine spezielle Silogeometrie. Versuche, die allgemein gültige Schüttgutkennwerte für die Bemessung von unterschiedlichen Silos liefern sollen, sind unter Zugrundelegung folgender Referenzlastniveaus durchzuführen:

- a) zur Berücksichtigung der Vertikallasten (C.6, C.8 und C.9): Referenzspannung $\sigma_r = 100$ kPa;
- b) zur Berücksichtigung der Horizontallasten (C.7.2): Referenzspannung $\sigma_r = 50$ kPa.

C.3 Symbole

In diesem Anhang werden folgende Symbole verwendet:

- a_x Umrechnungsfaktoren für die Schüttgutkennwerte zur Berücksichtigung der Streuung
- c Kohäsion (siehe Bild C.4)
- D innerer Durchmesser der Versuchszelle

- F_r Restscherwiderstand (-kraft) am Ende der Wandreibungsversuche (siehe Bild C.2b)
- K_{mo} Mittelwert des Horizontallastverhältnisses bei glatten Wänden
- Δ Verschiebung des oberen Teils der Scherzelle während des Scherversuchs
- φ_i Winkel der inneren Reibung bei Belastung der Probe (Winkel der Gesamtscherfestigkeit)
- φ_c Winkel der inneren Reibung bei einer Entlastung der Probe („wirksamer innerer Reibungswinkel“)
- μ Koeffizient der Reibung zwischen Schüttgut- und Wandprobe (Wandreibungskoeffizient)
- σ_r Referenzspannung
- τ_a in einem Scherversuch gemessene Restscherfestigkeit nach Erhöhung der Normalspannung (siehe Bild C.4) (bei Erstbelastung)
- τ_b in einem Scherversuch gemessene maximale Scherfestigkeit nach Reduzierung der Normalspannung (siehe Bild C.4) (bei Entlastung)
- τ in einem Scherversuch gemessene Scherspannung

C.4 Begriffe

Für die Anwendung dieses Anhangs gelten folgende Begriffe.

C.4.1

sekundäre Parameter

jeder Parameter, der die Kennwerte des gespeicherten Materials beeinflussen kann, aber nicht unter den Haupteinflussfaktoren für die Streuung der Kennwerte aufgeführt ist. Sekundäre Parameter sind z. B. die Zusammensetzung, die Kornabstufung (Korngrößenverteilung), der Feuchtigkeitsgehalt, die Temperatur, das Alter, die elektrische Aufladung während des Betriebs und die Produktionsmethoden. Streuungen in den unter C.2 definierten Referenzspannungen sind als sekundäre Parameter zu betrachten

C.4.2

Probennahme

die Auswahl von repräsentativen Proben des zur Lagerung vorgesehenen Schüttgutes oder des Materials der Silowand unter Einbezug der Veränderlichkeit derer Eigenschaften mit der Zeit

C.4.3

Referenzspannung

Spannungszustand, bei welchem die Messungen der Schüttgutkennwerte durchgeführt werden. Die Referenzspannung wird üblicherweise so ausgewählt, dass sie dem nach dem Füllen des Silos im Schüttgut vorherrschenden Spannungsniveau entspricht. Manchmal kann es notwendig sein, die Referenzspannung über mehr als nur eine Hauptspannung zu definieren

C.5 Probennahme und Probenvorbereitung

- (1) Die Versuche sind mit repräsentativen Proben der zur Lagerung im Silo vorgesehenen Schüttgüter durchzuführen.
- (2) Die Auswahl der Proben hat unter einer geeigneten Betrachtung der während der Nutzungsdauer des Silos möglichen Änderungen der Schüttgutparameter, außerdem der Änderungen infolge von wechselnden

DIN 1055-6:2005-03

Umgebungsbedingungen, der Auswirkungen der Verfahren des Silobetriebes und der Auswirkungen von möglichen Entmischungen des Schüttgutes im Silo zu erfolgen.

(3) Der Mittelwert jedes Schüttgutkennwertes ist unter Berücksichtigung einer geeigneten Streuung der relevanten sekundären Parameter zu bestimmen.

(4) Die Referenzspannung σ_r ist für jeden Versuch im Verhältnis zu dem Spannungszustand im gespeicherten Schüttgut zu ermitteln. Der Wert der Referenzspannung muss jedoch nicht genau definiert sein.

ANMERKUNG 1 Eine präzise Ermittlung der Referenzspannung würde bedeuten, dass das Versuchsergebnis vor Durchführung der Versuche bekannt sein müsste. Die Berücksichtigung eines Näherungswertes der Referenzspannung ist für die Interpretation der Versuchsergebnisse nicht kritisch. Die Versuche sind aber unter einem Spannungsniveau durchzuführen, welches für den Anwendungszweck, für den die Versuche durchzuführen sind, angemessen ist.

(5) Für die Versuche nach C.6, C.7.2, C.8.1 und C.9 ist das nachfolgend beschriebene Verfahren zur Vorbereitung der Probe durchzuführen.

(6) Die Probe ist ohne Vibrationen oder andere Maßnahmen, die zur Verdichtung der Probe führen, in die Versuchszelle einzufüllen und mit der Referenzspannung σ_r zu belasten. Um die Probe zu konsolidieren, ist eine Deckplatte im und gegen Uhrzeigersinn mehrere Male in einem Winkel von etwa 10° um ihre vertikale Achse hin und her zu drehen („twisten“).

ANMERKUNG 2 Die Anzahl der erforderlichen Drehungen („Twists“) hängt von dem zu prüfenden Schüttgut ab.

(7) Die Mittelwerte aus den Versuchen sind mit einem Umrechnungsfaktor zu multiplizieren, um Extremwerte abzuleiten. Die Umrechnungsfaktoren sind so zu wählen, dass sie den Einfluss der Sekundärparameter, die Veränderlichkeit der Schüttgutkennwerte mit der Betriebsdauer und die Ungenauigkeiten bei der Probennahme berücksichtigen.

(8) Der Umrechnungsfaktor a eines Schüttgutkennwertes muss angepasst werden, falls der Einfluss eines der sekundären Parameter mehr als 75 % der Streubreite beträgt, die durch den Umrechnungsfaktor (Konversionsfaktor) abgedeckt wird.

C.6 Bestimmung der Schüttgutwichte γ

C.6.1 Kurzbeschreibung

Die Schüttgutwichte γ ist an einer konsolidierten („überkritisch“ verdichteten) Schüttgutprobe zu bestimmen.

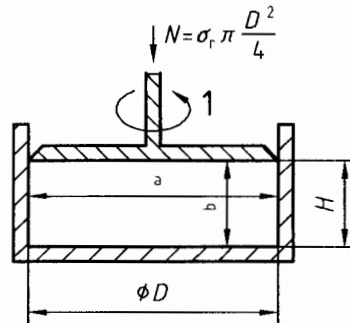
ANMERKUNG Der Zweck/Sinn dieser Prüfung ist, eine gute Abschätzung der sich im Silo einstellenden maximalen Schüttgutdichte zu erhalten. Das Ziel wird dadurch erreicht, dass die Dichte ermittelt wird, die sich nach Belastung der Schüttgutprobe mit dem nach dem Füllen des Silos vorherrschenden Druckniveau maximal einstellt. Um dies zu erreichen, ist es erforderlich, das Schüttgut in die Versuchszelle so einzufüllen, dass sich eine geeignete dichte Schüttgutpackung einstellt, bevor die Konsolidierungsspannung auf die Probe aufgebracht wird. Dies kann entweder dadurch erreicht werden, dass das Schüttgut über das „Regenfüllverfahren“ in die Scherzelle eingefüllt wird, oder über eine Vorbehandlung der Probe durch das beschriebene „Twisten“ der Deckplatte. Dadurch soll eine Schüttgutdichte in der Messzelle erzielt werden, die für die Bedingungen in Hinblick auf die Ermittlung der Silolasten repräsentativ ist. Diese Prozedur weicht wesentlich von dem Verfahren ab, welches im ASTM D6683-01 angegeben ist, weil dort hauptsächlich staubförmige Schüttgüter mit dem Ziel, eine möglichst geringe Dichte zu erreichen, behandelt werden.

C.6.2 Prüfapparatur

Zur Bestimmung des Gewichts und Volumens einer Schüttgutprobe ist die Scherzelle nach Bild C.1 anzuwenden. Der Zellendurchmesser D muss mindestens das 5fache des maximalen

Schüttgutkorndurchmessers betragen und darf nicht kleiner als das 10fache der mittleren Korngröße sein. Die Höhe H der komprimierten Probe muss zwischen $0,3D$ und $0,4D$ liegen.

ANMERKUNG Diese Einschränkungen in Bezug auf die Korngröße des Schüttgutes sind aus folgenden Gründen gewählt: Die begrenzte maximale Schüttgutkorngröße soll sicherstellen, dass die Beeinträchtigungen in Hinblick auf die Anordnung und Orientierung der Schüttgutkörner infolge des Einflusses der begrenzenden Wand nicht zu groß werden. Darüber hinaus ist bekannt, dass dieser Einfluss für den Fall größer ist, dass die Partikel alle in etwa die gleiche Größe haben, als in dem Fall, dass die kleineren Partikel die Zwischenräume zwischen den größeren Partikeln einnehmen können. Aus diesem Grund ist bei gleichmäßigen Partikelgrößen die Begrenzung auf die 10fache Partikelgröße und bei einer breiten Verteilung der Partikelgrößen die Begrenzung auf das 5fache der maximalen Partikeldurchmesser maßgebend.



Legende

- 1 genormtes Drehen
- a Oberfläche, glatt
- b Oberfläche, rau

Bild C.1 — Vorrichtung zur Bestimmung von γ

C.6.3 Verfahren/Vorgehen

(1) Die Referenzspannung σ_r hat dem vertikalen Druckniveau p_v des im Silo gespeicherten Schüttgutes zu entsprechen.

(2) Die Probenvorbereitung hat entsprechend dem Vorgehen nach C.5 zu erfolgen. Die Wichte der Probe ist über den Quotient von gemessenem Gewicht der konsolidierten Probe und vom Schüttgut eingenommenen Volumen zu bestimmen. Die Probenhöhe H ist als Mittelwert von drei Messungen zu bestimmen, die in gleicher radialer Entfernung zum Mittelpunkt der Zelle innerhalb von drei in Umfangsrichtung zu wählenden 120°-Sektorenabschnitten zu messen sind.

ANMERKUNG Die nach dem Verfahren nach ASTM D6683 ermittelten Dichten können geringer ausfallen. Die Abweichung ist bei staubförmigem Schüttgut im Allgemeinen gering, bei grobkörnigem Schüttgut kann sie aber signifikante Beträge annehmen.

C.7 Wandreibung

C.7.1 Allgemeines

(1) Es ist zwischen folgenden beiden Parametern zu unterscheiden:

- Koeffizient der Wandreibung μ_m für die Ermittlung der Lasten (Wandreibungskoeffizient);
- Wandreibungswinkel φ_{wh} zur Beurteilung des Fließverhaltens.

DIN 1055-6:2005-03

(2) Bei Schüttgütern mit einer breiten Korngrößenverteilung, die während des Füllvorganges zum Entmischen neigen, ist die Auswahl der Materialproben zur Bestimmung des Wandreibungskoeffizienten μ_m unter Berücksichtigung von möglichen Materialentmischungen vorzunehmen.

(3) Wandreibungsversuche sind mit Wandprobenstücken durchzuführen, die repräsentativ für das Material der Wandoberflächen der Silokonstruktion sind.

ANMERKUNG 1 Obwohl die Versuchslaboratorien unter Umständen mit einer großen Bandbreite von Konstruktions- und Auskleidungsmaterialien ausgestattet sind, können die individuellen Wandprobenstücke Oberflächenbearbeitungen aufweisen, die sich von der Oberflächenbeschaffenheit zum Zeitpunkt der Siloherstellung unterscheiden. Wandprobenstücke mit nominell identischer Bezeichnung können Wandreibungswinkel ausweisen, die um mehrere Grade voneinander abweichen. Wo dies möglich ist, sind die Wandprobenstücke vom voraussichtlichen Hersteller des Konstruktionsmaterials zu beschaffen (z. B. Walzwerk oder Behälterhersteller). Beschichtete Stahloberflächen sind mit demselben Beschichtungsfabrikat zu beschichten. Bei Großprojekten wird empfohlen, die Wandprobenstücke für einen späteren Vergleich mit der tatsächlich hergestellten Oberfläche aufzubewahren. Es ist gegenwärtig nicht möglich, Wandoberflächen in der Art zu charakterisieren, dass damit die Wandreibungsverhältnisse zuverlässig vorhergesagt werden kann.

(4) Wenn die Silowand später Korrosion oder Abrieb ausgesetzt sein kann, sind die Wandreibungsversuche mit Wandprobenstücken durchzuführen, die die tatsächlich vorliegenden Bedingungen unmittelbar nach der Herstellung und nach den unterschiedlichen Verschleiß- und Nutzungsbedingungen entsprechend berücksichtigen.

ANMERKUNG 2 Die Beschaffenheit der Wandoberflächen in Silos kann sich mit der Zeit verändern. Korrosion kann zu einer Aufrauung der Oberfläche führen, eine Beanspruchung auf Abrieb kann die Oberfläche sowohl aufrauen als auch glätten. Oberflächen aus Materialien wie Polyethylen können ausgehöhlt werden, beschichtete Oberflächen können verkratzen. Silowände können aber auch glatter werden, indem sich feine Bestandteile aus den Schüttgütern wie z. B. Fette oder Feinkorn in kleinen Poren der Wandoberfläche ansammeln. Diese Änderungen können zu einer Änderung des Fließverhaltens führen, sogar in einem Ausmaß, dass z. B. Kernfluss in einem ursprünglich für Massenfluss ausgelegten Silo entsteht oder umgekehrt. Die Horizontal- und Vertikallasten können in Silos mit polierten Wandoberflächen, die Wandreibungslasten bei aufgerauten Wänden zunehmen.

C.7.2 Wandreibungskoeffizient μ_m zur Ermittlung der Lasten

C.7.2.1 Kurzbeschreibung

Eine Schüttgutprobe wird entlang einer die Wandoberfläche repräsentierenden Fläche abgesichert – im Falle eines Wellblechsilos entlang einer gewellten Probe. Dabei wird die Schubkraft entlang der gesicherten Fläche gemessen.

ANMERKUNG Bei der Interpretation der Daten aus den Scherversuchen ist Sorgfalt insbesondere in Hinblick darauf walten zu lassen, ob Lastberechnungen oder Betrachtungen zum Fließverhalten durchgeführt werden.

C.7.2.2 Prüfapparatur

Die Prüfapparatur ist in Bild C.2 dargestellt. Der Zellendurchmesser muss mindestens den 20fachen Wert des Größtkorndurchmessers des Schüttgutes betragen und darf nicht kleiner sein als der 40fache Wert der mittleren Partikelgröße. Die Höhe H der komprimierten Probe muss zwischen $0,15D$ und $0,2D$ liegen. Im Fall von Wandproben mit Unstetigkeiten, wie z. B. bei einer gewellten Wand, ist die Zellengröße entsprechend anzupassen.

ANMERKUNG Diese Einschränkungen in Bezug auf die Korngröße des Schüttgutes sind aus folgenden Gründen gewählt: Die begrenzte maximale Schüttgutkorngröße soll sicherstellen, dass die Beeinträchtigungen in Hinblick auf die Anordnung und Orientierung der Schüttgutkörner infolge des Einflusses der begrenzenden Wand nicht zu groß werden. Darüber hinaus ist bekannt, dass dieser Einfluss für den Fall größer ist, dass die Partikel alle in etwa die gleiche Größe haben, als in dem Fall, dass die kleineren Partikel die Zwischenräume zwischen den größeren Partikeln einnehmen können. Aus diesem Grund ist bei gleichmäßigen Partikelgrößen die Begrenzung auf die 40fache Partikelgröße und bei einer weiten Partikelgrößenverteilung die Begrenzung auf das 20fache der maximalen Partikeldurchmesser maßgebend.

C.7.2.3 Verfahren/Vorgehen

- (1) Als Referenzspannung σ_r ist die größte im Silo auftretende Horizontallast p_h zugrunde zu legen.
- (2) Die Probenvorbereitung hat entsprechend dem Vorgehen nach C.5 zu erfolgen.
- (3) Das Abscheren der Probe ist so durchzuführen, dass eine konstante Vorschubgeschwindigkeit von etwa 0,04 mm/s sichergestellt ist.
- (4) Bei der Ermittlung des Wandreibungskoeffizienten ist der Residualwert der Reibungskraft F_r (siehe Bild C.2) bei großen Verformungen zu verwenden.
- (5) Der aus dem Versuch ermittelte Wandreibungskoeffizient für die Lastermittlung ist zu bestimmen als

$$\mu = \frac{F_r}{N} \quad (\text{C.1})$$

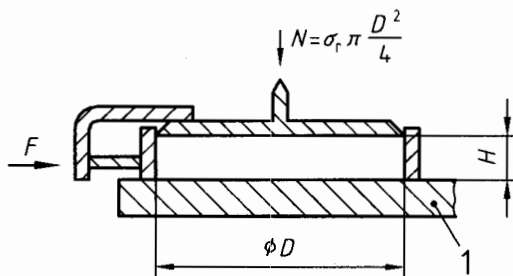
Dabei ist

F_r der End- bzw. Residualwert der Scherkraft (siehe Bild C.2b);

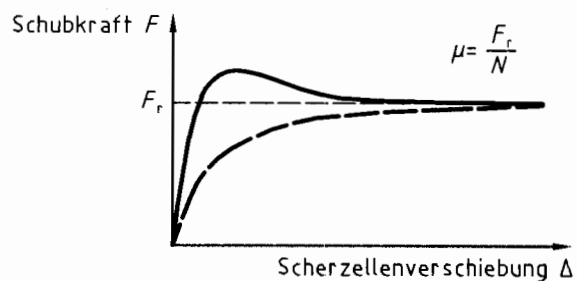
N die auf den Deckel der Scherzelle aufgebrachte Vertikallast.

C.7.3 Wandreibungswinkel φ_{wh} für Untersuchungen zum Fließverhalten

- (1) Der Wandreibungswinkel φ_{wh} für Untersuchungen zum Fließverhalten kann nach den Angaben in Bild C.2 bestimmt werden.
- (2) Der Wandreibungswinkel für Untersuchungen zum Fließverhalten des Schüttgutes ist bei niedrigen Spannungsniveaus zu ermitteln.



a) Scherzelle zur Messung der Wandreibung



b) Typische Schubkraft-Verformungsbeziehungen

Legende

1 Wandprobe

Bild C.2 — Prüfverfahren zur Bestimmung des Wandreibungskoeffizienten

DIN 1055-6:2005-03

C.8 Horizontallastverhältnis K

C.8.1 Direkte Messung

C.8.1.1 Versuchsprinzip

Unter Behinderung der Horizontalverformungen ist auf eine Probe eine vertikale Spannung σ_1 aufzubringen und die aus dieser Belastung resultierende Horizontalspannung σ_2 zu messen. Daraus ist der Sekantenwert des Horizontallastverhältnisses K_0 zu bestimmen.

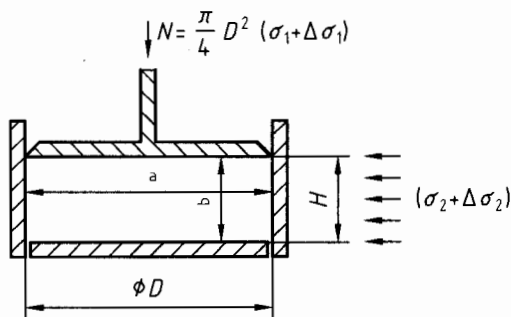
ANMERKUNG 1 Die Größe des Koeffizienten K_0 ist von den Richtungen der sich in der Probe ausbildenden Hauptspannungen abhängig. Bei der Auswertung der Versuche sind die Horizontal- und Vertikalspannungen näherungsweise als Hauptspannungen in der Probe anzusehen. Im Silo ist dies in der Regel nicht der Fall.

ANMERKUNG 2 Unter einer Probe, bei der die Horizontalverformungen behindert sind, ist gemeint, dass die horizontalen Dehnungen im Schüttgut so klein gehalten werden, dass deren Einfluss auf die Spannungen in der Schüttgutprobe vernachlässigbar ist. Dennoch sind diese Dehnungen groß genug, dass sie in der dünnen Wand der Scherzelle oder in speziellen Bereichen der Wand, die für konzentrierte Dehnungen zu bemessen sind, messbare Beträge annehmen. Im Allgemeinen erfüllt eine mittlere Umfangsdehnung in der Größenordnung von 1/10 Promille dieses Kriterium von begrenzten Dehnungen in der Schüttgutprobe bei gleichzeitiger Messbarkeit von Verformungen in der Apparaturwand.

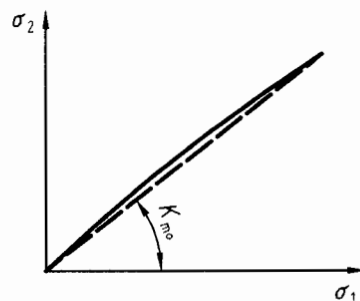
C.8.1.2 Apparatur

Die Geometrie der Versuchsapparatur zeigt Bild C.3. Die Horizontalspannungen sind aus den an der Außenfläche des vertikalen Ringes gemessenen Dehnungen abzuleiten. Hierzu muss die Messzellenwand dünn genug und so dimensioniert sein, dass der Spannungszustand in der Wand richtig interpretiert werden kann.

ANMERKUNG Im Allgemeinen ist hierfür eine von dem Ring der Zellwand getrennte Grundplatte erforderlich, damit sowohl horizontale als auch vertikale Dehnungsmessungen ohne gegenseitige Beeinträchtigung möglich sind. Es ist weiterhin erforderlich, dass die Messstellen für die Dehnungen in ausreichender Entfernung von den Probenrändern positioniert werden. Zudem sollte sichergestellt sein, dass die gemessenen Dehnungen mit den inneren horizontalen Spannungen über einen Umrechnungsfaktor in Beziehung stehen, wobei die Biegung der Wände der Versuchsapparatur in dieser Beziehung vernachlässigt werden kann.



a) Versuchseinrichtung

b) Typische Entwicklung von σ_2 mit zunehmendem σ_1

Legende

- a Oberfläche, glatt
- b Oberfläche, rau

Bild C.3 — Prüfverfahren zur Bestimmung von K_0

C.8.1.3 Verfahren/Vorgehen

- (1) Die Referenzspannung σ_r hat dem größten zu erwartenden vertikalen Druckniveau p_v des im Silo gespeicherten Schüttgutes zu entsprechen.
- (2) Die Probenvorbereitung hat entsprechend dem Vorgehen nach C.5 zu erfolgen.
- (3) Es ist die aus der Vertikalbelastung σ_1 – die der Referenzspannung σ_r entspricht – resultierende Horizontalspannung σ_2 in der Probe zu betrachten. Der Wert von K_o ist aus diesen Spannungskomponenten (siehe Bild C.3) zu berechnen als:

$$K_o = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (\text{C.2})$$

- (4) Der Wert von K ist anzunehmen als:

$$K = 1,1 K_o \quad (\text{C.3})$$

ANMERKUNG Über den Faktor 1,1 in Gleichung (C.3) sollte dem Unterschied zwischen dem unter nahezu keinen Wandreibungseinflüssen gemessenen Horizontallastverhältnis (= K_o) in der Scherzelle und dem Wert K unter Einfluss einer Wandreibung im Silo Rechnung getragen werden (siehe auch 6.3.5 (5)).

C.8.2 Indirekte Messung

Ein Näherungswert für K kann vom Winkel der inneren Reibung bei Belastung φ_i abgeleitet werden, der entweder über das in C.9 beschriebene Verfahren oder über einen Triaxialversuch bestimmt werden kann. Wenn der Wert K aus φ_i abgeleitet wird, ist die Abschätzung in Gleichung (7) zu verwenden.

C.9 Festigkeitsparameter: Kohäsion c und Winkel der inneren Reibung φ_i

C.9.1 Direkte Messung

C.9.1.1 Versuchsprinzip

Die Festigkeit einer Schüttgutprobe kann über Scherzellenversuche bestimmt werden. Zur Beschreibung der Auswirkung der Festigkeit von in Silozellen gelagerten Schüttgütern auf die Silolasten sind die beiden Parameter – c und φ_i – zu verwenden.

C.9.1.2 Apparatur

Als Versuchseinrichtung ist eine zylindrische Scherzelle nach Bild C.4 zu verwenden. Der Zellendurchmesser muss mindestens den 20fachen Wert des Größtkorndurchmessers des Schüttgutes betragen und darf nicht kleiner als der 40fache Wert der mittleren Partikelgröße sein. Die Höhe H der komprimierten Probe muss zwischen $0,3D$ und $0,4D$ liegen.

ANMERKUNG Diese Einschränkungen in Bezug auf die Korngröße des Schüttgutes sind aus folgenden Gründen gewählt: Die begrenzte maximale Schüttgutkorngröße sollte sicherstellen, dass die Beeinträchtigungen in Hinblick auf die Anordnung und Orientierung der Schüttgutkörner infolge des Einflusses der begrenzenden Wand nicht zu groß werden. Darüber hinaus ist bekannt, dass dieser Einfluss für den Fall größer ist, dass die Partikel alle in etwa die gleiche Größe haben, als in dem Fall, dass die kleineren Partikel die Zwischenräume zwischen den größeren Partikeln einnehmen können. Aus diesem Grund ist bei gleichmäßigen Partikelgrößen die Begrenzung auf die 40fache Partikelgröße und bei einer weiten Partikelgrößenverteilung die Begrenzung auf das 20fache der maximalen Partikeldurchmesser maßgebend.

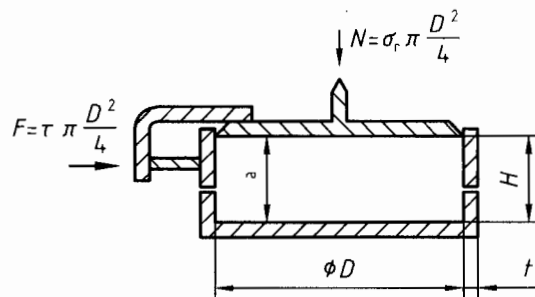
DIN 1055-6:2005-03

C.9.1.3 Verfahren/Vorgehen

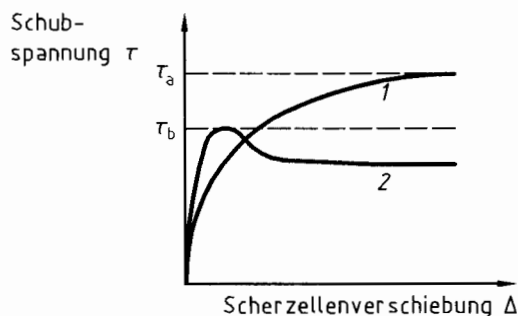
(1) Die Referenzspannung σ_r muss näherungsweise dem zu erwartenden vertikalen Druckniveau des im Silo gespeicherten Schüttgutes p_v nach C.2 entsprechen. Die Probenvorbereitung ist entsprechend dem Vorgehen nach C.5 vorzunehmen.

(2) Das Abscheren der Probe ist mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von etwa 0,04 mm/s durchzuführen.

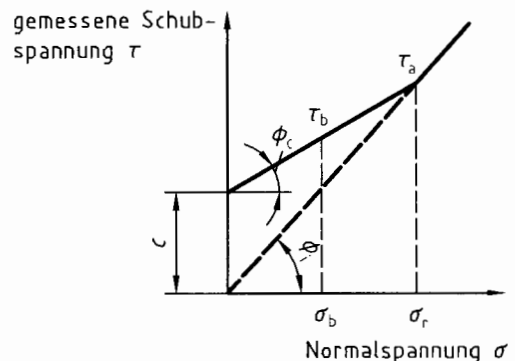
(3) Der Bestimmung der Festigkeitsparameter des Schüttgutes ist die bei oder vor einer Horizontalverschiebung von $\Delta = 0,06 D$ ermittelte Scherspannung τ zugrunde zu legen, wobei D den inneren Zellen-durchmesser darstellt (siehe Bild C.4).



a) Scherzelle



b) Typische Scherspannungs-Verschiebungs-Kurve



c) In einem Scherversuch gemessene typische Scherspannungs-Normalspannungsbeziehung

Legende

- 1 Kurve a
- 2 Kurve b

Bild C.4 — Prüfverfahren zur Bestimmung der Winkel der inneren Reibung φ_i und φ_c und der Kohäsion c basierend auf der beim Vorverdichten aufbrachten Spannung σ_r

(4) Es sind mindestens zwei Versuche nach den unter (5) und (6) definierten Bedingungen durchzuführen (Tabelle C.1 und Bild C.4).

(5) Zur Ermittlung der Schubspannung τ_a ist eine erste Materialprobe unter einer Normallast entsprechend der Referenzspannung σ_r durchzuführen.

(6) Eine zweite Probe ist zunächst wie die erste Probe unter einer Normallast entsprechend der Referenzspannung σ_r nur gerade bis zum Abscheren zu bringen. Danach ist die Normallast auf circa den halben Wert der Referenzspannung zu reduzieren ($\sigma_b \approx \sigma_r/2$). Anschließend ist sie bei diesem Spannungsniveau weiter abzuscheren, um die maximale Schubspannung τ_b zu erhalten (siehe Bild C.4b). Die aus diesen beiden Versuchen ermittelten Spannungen sind in Tabelle C.1 genannt.

Tabelle C.1 — Versuchsparmeter

Versuch	Betrag der Vorbelastung	Normalspannung im Versuch	Gemessene maximale Schubspannung
Nr. 1	σ_r	σ_r	τ_a
Nr. 2	σ_r	$\sigma_b \approx \sigma_r/2$	τ_b

C.9.1.4 Auswertung

(1) Der Winkel der inneren Reibung bei Belastung φ_i des gespeicherten Schüttgutes ist zu ermitteln mit:

$$\varphi_i = \arctan(\tau_a / \sigma_r) \quad (\text{C.4})$$

(2) Die unter der Referenzspannung σ_r im Schüttgut aktivierte Kohäsion c ist zu berechnen mit:

$$c = \tau_a - \sigma_r \tan \varphi_c \quad (\text{C.5})$$

mit:

$$\varphi_c = \arctan\left(\frac{\tau_a - \tau_b}{\sigma_r - \sigma_b}\right) \quad (\text{C.6})$$

Dabei ist

φ_c der Winkel der inneren Reibung bei Entlastung einer überkritisch konsolidierten Probe.

ANMERKUNG 1 Der Wert der Kohäsion c hängt stark von der Konsolidierungsspannung σ_r ab und kann somit nicht als eine feste Materialkenngröße angesehen werden.

(3) Bei einem kohäsionslosen Schüttgut (d. h. $c = 0$) ist die Scherfestigkeit nur über den Winkel der inneren Reibung φ_i – welcher dann φ_c entspricht – zu beschreiben.

ANMERKUNG 2 Alternativ zu den oben beschriebenen Versuchen kann ein genormter Triaxialversuch angewendet werden.

C.9.2 Indirekte Messung

(1) Die Kohäsion eines Schüttgutes kann auch näherungsweise aus der Ergebnissen aus Scherversuchen mit einer Scherzelle von Jenike bestimmt werden.

(2) Die Kohäsion sollte unter Druckverhältnissen entsprechend dem maximalen Vertikaldruck σ_{vft} im Silo nach dem Füllen (siehe Ausführungen in C.2) ermittelt werden.

DIN 1055-6:2005-03

- (3) Als maximale Konsolidierungsspannung σ_c ist der maximale Vertikaldruck im Silo nach dem Füllen σ_{Vft} anzusetzen.
- (4) Die dieser Konsolidierungsspannung entsprechende einachsige Fließspannung σ_u ist aus der Fließfunktion zu bestimmen. Zudem ist der Winkel der effektiven inneren Reibung δ unter den entsprechenden Spannungsbedingungen zu ermitteln.
- (5) Es lässt sich folgender Näherungswert für die Kohäsion bestimmen:

$$c = \sigma_c \left(\frac{\sin \delta - \sin \varphi_c}{\cos \varphi_c (1 + \sin \delta)} \right) \quad (\text{C.7})$$

mit:

$$\varphi_c = \arcsin \left(\frac{2 \sin \delta - k}{2 - k} \right) \quad (\text{C.8})$$

$$k = \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_u} \right) (1 + \sin \delta) \quad (\text{C.9})$$

Dabei ist

- σ_c die maximale Konsolidierungsspannung im Versuch mit der Scherzelle von Jenike;
- σ_u die einachsige Fließspannung aus dem Versuch mit der Scherzelle von Jenike;
- δ der effektive Winkel der inneren Reibung aus dem Versuch mit der Scherzelle von Jenike;
- φ_c der Winkel der inneren Reibung bei Entlastung (siehe Bild C.4c).

ANMERKUNG 1 Die Größenordnung der Kohäsion c hängt stark von der Konsolidierungsspannung σ_c ab und stellt somit keinen unabhängigen Materialkennwert des Schüttgutes dar.

- (6) Ein Näherungswert für den Winkel der inneren Reibung bei Entlastung φ_i kann aus den Versuchen mit der Scherzelle von Jenike nach (C.10) abgeschätzt werden.

$$\varphi_i = \arctan \left(\frac{\sin \delta \cos \varphi_c}{1 - \sin \varphi_c \sin \delta} \right) \quad (\text{C.10})$$

ANMERKUNG 2 Die beiden Parameter c und φ_i werden in dieser Norm nur zur Abschätzung der Auswirkung der Schüttgutfestigkeit auf die Silodrücke verwendet.

C.10 Effektiver Elastizitätsmodul E_s

C.10.1 Direkte Messung

C.10.1.1 Versuchsprinzip

Auf eine seitlich gehaltene Probe ist eine Vertikallast σ_1 aufzubringen. Zu jedem Lastinkrement $\Delta\sigma_1$ (vertikal) sind die resultierende Horizontalspannung $\Delta\sigma_2$ und die Änderung der Vertikalverschiebung Δv_1 zu messen. Aus diesen Messungen ist der effektive Elastizitätsmodul bei Belastung E_{sL} (Belastungsmodul) über das inkrementelle Horizontallastverhältnis K abzuleiten. Die Vertikallast ist danach um den Betrag $\Delta\sigma_1$ zu reduzieren, die Änderung der Horizontalspannung $\Delta\sigma_2$ und der Vertikalverschiebung Δv_1 ist zu messen. Aus diesen Messungen ist der effektive Elastizitätsmodul bei Entlastung E_{sU} (Entlastungsmodul) abzuleiten.

ANMERKUNG 1 Die Größenordnung von E_s und E_{sU} ist von der Richtung der Hauptspannungen in der Probe abhängig. Die horizontalen und vertikalen Spannungen entsprechen in der Probe näherungsweise den Hauptspannungen, wobei dies im Silo in der Regel nicht der Fall ist.

ANMERKUNG 2 Unter einer Probe, deren Horizontalverformungen behindert sind, ist zu verstehen, dass die horizontalen Dehnungen im Schüttgut so klein gehalten werden, dass deren Einfluss auf die Spannungen in der Schüttgutprobe vernachlässigbar ist. Dennoch sind diese Dehnungen groß genug, dass sie an der dünnen Wand der Prüfapparatur messbare Beträge annehmen. Allgemein erfüllt eine mittlere Umfangsdehnung in der Größenordnung von 1/10 ‰ dieses Kriterium.

C.10.1.2 Apparatur

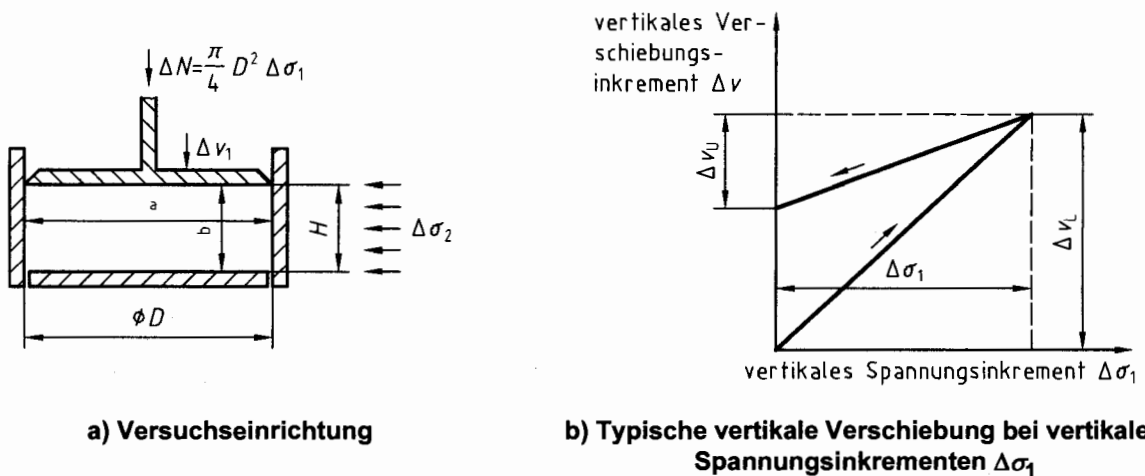
(1) Die Geometrie der zu verwendenden Versuchsapparatur ist in Bild C.5 dargestellt. Sie ist der in C.8 beschriebenen Apparatur zur Messung des Horizontallastverhältnisses K ähnlich.

(2) Die Horizontalspannungen sind aus den an der Außenfläche des vertikalen Ringes gemessenen Dehnungen abzuleiten. Hierzu muss die Messzellenwand dünn genug und so dimensioniert sein, dass der Spannungszustand in der Wand richtig interpretiert werden kann.

ANMERKUNG Im Allgemeinen ist hierfür eine von den Scherzellenwänden getrennte Grundplatte erforderlich, damit sowohl horizontale als auch vertikale Dehnungsmessungen ohne gegenseitige Beeinträchtigung möglich sind. Es ist weiterhin erforderlich, dass die Dehnungen in ausreichender Entfernung von den Proberändern gemessen werden. Es sollte sichergestellt sein, dass die gemessenen Dehnungen proportional zu den inneren horizontalen Spannungen sind, wobei die Biegung der Versuchsapparaturwände in dieser Beziehung vernachlässigt werden kann.

(3) Es ist dafür zu sorgen, dass sich geeignete kleine inkrementelle Beträge der Vertikalverformungen der Probe einstellen.

DIN 1055-6:2005-03



a) Versuchseinrichtung

b) Typische vertikale Verschiebung bei vertikalen Spannungskrementen $\Delta\sigma_1$

Legende

- a Oberfläche, glatt
b Oberfläche, rau

Bild C.5 — Prüfverfahren zur Bestimmung der Elastizitätsmoduli bei Be- und Entlastung

C.10.1.3 Verfahren/Vorgehen

- (1) Als Referenzspannung σ_r ist das größte zu erwartende Niveau der Vertikaldrücke p_v des im Silo gespeicherten Schüttgutes anzunehmen.
- (2) Die Probenvorbereitung hat entsprechend dem Vorgehen nach C.5 zu erfolgen.
- (3) Nach dem Aufbringen einer Vertikallast σ_1 entsprechend der Referenzspannung σ_r sind die Horizontalspannungen und Vertikalverformungen abzulesen. Die Höhe der Materialprobe H ist sorgfältig zu messen (siehe C.6.3).
- (4) Es ist ein kleines Inkrement der Vertikalspannung $\Delta\sigma_1$ aufzubringen und wieder sind die Horizontalspannungen und Vertikalverformungen zu messen. Das Inkrement der Vertikalspannungen ist näherungsweise zu 10 % der Referenzspannung σ_1 zu wählen.
- (5) Es ist die Änderung in der Horizontalspannung $\Delta\sigma_2$ infolge des vertikalen Lastinkrements $\Delta\sigma_1$ zu ermitteln und die Änderungen der vertikalen Verschiebungen Δv (beide negativ) sind zu messen. Der inkrementelle Wert unter Belastung von K ist dann zu bestimmen als K_L :

$$K_L = \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} \quad (\text{C.11})$$

- (6) Der effektive Elastizitätsmodul E_{sL} unter Belastung ist dann abzuleiten als

$$E_{sL} = H \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta v} \left(1 - \frac{2K_L^2}{1 + K_L} \right) \quad (\text{C.12})$$

(7) Es ist anschließend eine geringe inkrementelle Reduzierung der Vertikalbelastung $\Delta\sigma_1$ vorzunehmen (zu behandeln als Größe mit negativem Vorzeichen) und die resultierenden Änderungen der Horizontalspannungen und vertikalen Verformungen sind zu messen. Das Inkrement der Vertikalbelastung $\Delta\sigma_1$ sollte näherungsweise 10 % der Referenzspannung σ_1 betragen.

(8) Es ist die Änderung in der Horizontalspannung $\Delta\sigma_2$ infolge des vertikalen Lastinkrements $\Delta\sigma_1$ zu ermitteln und die Änderungen der vertikalen Verschiebungen Δv (beide negativ) sind zu messen. Der inkrementelle Wert von K bei Entlastung ist dann zu bestimmen als K_U :

$$K_U = \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} \quad (\text{C.13})$$

(9) Der effektive Elastizitätsmodul E_{sU} bei Entlastung lässt sich dann ableiten zu:

$$E_{sU} = H \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta v} \left(1 - \frac{2K_U^2}{1+K_U} \right) \quad (\text{C.14})$$

ANMERKUNG Der effektive Elastizitätsmodul bei Entlastung ist gewöhnlich viel größer als der bei Belastung. In einer Abschätzung, bei der ein großer Elastizitätsmodul für das Tragwerk schädlich ist (z. B. bei Temperaturänderungen) ist der Elastizitätsmodul bei Entlastung (Entlastungsmodul) zu verwenden. Ist der Elastizitätsmodul des Schüttgutes für die Konstruktion günstig (z. B. in dünnwandigen rechteckigen Silos), ist der Elastizitätsmodul bei Belastung (Belastungsmodul) zu verwenden.

C.10.2 Indirekte Abschätzung

(1) Als Hilfe zur speziellen Überprüfung der Justierung der Versuche kann E_{sU} als Näherungswert wie folgt abgeschätzt werden:

$$E_{sU} = \chi \rho_{vft} \quad (\text{C.15})$$

Dabei ist

ρ_{vft} die vertikale Spannung am unteren Ende des vertikalen Wandabschnittes (Gleichung (11) oder (86));

χ der Kontiguitätskoeffizient.

ANMERKUNG Der effektive Elastizitätsmodul bei Entlastung E_{sU} und die vertikale Spannung ρ_{vft} weisen in Gleichung (C.15) die gleiche Einheit auf.

(2) Bei fehlenden experimentellen Versuchsdaten entsprechend den Verfahren nach C.10.1 kann der Kontiguitätskoeffizient χ abgeschätzt werden:

$$\chi = 7 \gamma^{3/2} \quad (\text{C.16})$$

wobei für γ die Wichte des gespeicherten Schüttgutes dimensionsgebunden in kN/m^3 einzusetzen ist.

(3) Der Wert von χ kann alternativ dazu für trockene landwirtschaftliche Getreideprodukte zu 70, für feinkörnige mineralische Körnungen zu 100 und für grobkörnige mineralische Körnungen zu 150 angenommen werden.

C.11 Bestimmung der oberen und unteren charakteristischen Werte von Schüttgutparametern und Ermittlung des Umrechnungsfaktors a

C.11.1 Versuchsprinzip

(1) Der Silo ist für die ungünstigsten Belastungsbedingungen zu bemessen, denen er während seiner Nutzungsdauer ausgesetzt ist. Dieser Abschnitt behandelt die Abschätzung der Streuung der Schüttgutkennwerte, die in Schüttgutproben zum Zeitpunkt der Bemessung auftreten können.

ANMERKUNG 1 Es ist wahrscheinlich, dass sich die Kennwerte des gespeicherten Schüttgutes während der Nutzungsdauer ändern. Diese zeitlichen Veränderungen der Kennwerte sind aber nicht einfach abzuschätzen.

(2) Die Extremwerte der Bemessungslasten werden durch ihre charakteristischen Werte beschrieben. Dies sind Werte, die mit anerkannten vorgeschriebenen Wahrscheinlichkeiten – üblicherweise 5 %- und 95 %-Fraktile – während der vorgesehenen Nutzungsdauer oder Dauer des Bemessungszeitraums nicht überschritten werden.

(3) Die Extremwerte der Kennwerte, die zum Erreichen dieses extremen Lastniveaus benötigt werden, sind die charakteristischen Werte der Schüttgutparameter.

(4) Bei der Ermittlung der maßgeblichen Lastverhältnisse sind sowohl die oberen als auch unteren charakteristischen Werte zu verwenden.

(5) Es ist das hier beschriebene vereinfachte Verfahren zu verwenden, in dem der charakteristische Wert unter Zugrundelegung der 1,28fachen Standardabweichung vom Mittelwert betrachtet wird.

ANMERKUNG 2 Die entsprechenden Materialkennwerte für eine bestimmte Überschreitungswahrscheinlichkeit des Lastniveaus hängen von der Geometrie und der absoluten Größe des Behälters, dem betrachteten Lastfall und davon ab, ob die Lasten im vertikalen Siloschaft oder im Trichter zu betrachten sind. Zudem beeinflussen der Feuchtigkeitsgehalt, die Temperatur, die Neigung zur Entmischung und das Alter diese Werte.

ANMERKUNG 3 Wie in dem obigen Abschnitt dargelegt, tragen mehrere voneinander unabhängige Schüttguteigenschaften zu den charakteristischen Lasten bei. Deshalb wird ein 10- oder 90-Prozentwert jedes Kennwertes als geeignete und vernünftige Abschätzung für den Wert angesehen, die eine angemessene Auftretenswahrscheinlichkeit für die Bemessungslast repräsentiert.

(6) Zur Berechnung der maßgeblichen Lastbedingungen sind sowohl der obere als auch der untere charakteristische Wert der maßgeblichen Kennwerte zu verwenden.

(7) Falls adäquate experimentelle Daten zur Verfügung stehen, sind die charakteristischen Werte über die Anwendung von statistischen Methoden zu ermitteln.

ANMERKUNG 4 Obwohl Versuchsdaten eine hilfreiche Basis für die Bestimmung von charakteristischen Werten darstellen, unterliegen auch sie Einschränkungen wie z. B. Beschränkungen bei den Probengrößen, eingeschränkten Probenaufbereitungsverfahren usw. Diese Einschränkungen können dazu führen, dass die Daten für die Gesamtheit der Eigenschaften, die während der Dauer des Betriebs maßgeblich werden können, unrepräsentativ sind.

ANMERKUNG 5 Die Werte aus Tabelle E.1 gehen auf Festlegungen zurück, die auf eine Kombination von Erfahrung und tatsächlich ermittelten experimentellen Daten basieren.

(8) Falls der Auftraggeber oder Konstrukteur für eine spezielle Bemessungssituation über Datenmaterial oder Erfahrungswerte verfügt, kann der Auftraggeber die charakteristischen Schüttgutkennwerte aus diesem Datenmaterial ableiten, wenn diese die Bandbreite der Kennwerte der während der Nutzungsdauer verwendeten Schüttgüter repräsentieren.

C.11.2 Methoden zur Abschätzung

(1) Zur Beschaffung der charakteristischen Werte jedes Kennwertes können folgende Verfahren verwendet werden. Im Folgenden repräsentiert die Variable x die jeweilig betrachteten Kennwerte.

(2) Der Mittelwert des Kennwertes \bar{x} ist aus den Versuchsdaten zu ermitteln.

(3) Wo dies möglich ist, ist der Variationskoeffizient δ aus den zur Verfügung stehenden Versuchsdaten zu bestimmen.

(4) Wenn die Versuchsdaten für eine Bestimmung eines Variationskoeffizienten ungeeignet sind, ist ein geeigneter Wert für das Schüttgut abzuschätzen. Tabelle C.2 kann hierfür als Leitfaden dienen.

(5) Der obere charakteristische Wert eines Kennwertes ($x_u = x_{0,90}$) ist zu bestimmen mit:

$$x_{0,90} = \bar{x} (1 + 1,28 \delta) \quad (\text{C.17})$$

(6) Der untere charakteristische Wert eines Kennwertes ($x_l = x_{0,10}$) ist zu bestimmen mit:

$$x_{0,10} = \bar{x} (1 - 1,28 \delta) \quad (\text{C.18})$$

(7) Der Umrechnungsfaktor a_x eines Kennwertes ist zu bestimmen mit:

$$a_x = \sqrt{\frac{1+1,28\delta}{1-1,28\delta}} \approx 1 + 1,28\delta + \delta^2 \quad (\text{C.19})$$

(8) Wenn die Werte der Umrechnungsfaktoren abgeschätzt werden müssen, sind die Variationskoeffizienten δ für die Schüttgutwichte mit 0,10 anzusetzen. Bei den anderen Schüttgutkennwerten sind die Werte über die Angaben für die in der Tabelle C.2 gelisteten Schüttgüter mit ähnlichen Eigenschaften abzuschätzen.

Tabelle C.2 — Typische Werte der Variationskoeffizienten für die Schüttgutkennwerte

Schüttgut	Variationskoeffizient δ				
	Horizontallastverhältnis K	Winkel der inneren Reibung φ_i in Grad	Wandreibungskoeffizient μ		
			Wandrauigkeitsklasse		
			D1	D2	D3
Betonkies	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09
Aluminium	0,14	0,16	0,05	0,05	0,05
Krafftuttermisch	0,08	0,06	0,19	0,19	0,19
Krafftutterpellets	0,05	0,05	0,14	0,14	0,14
Gerste	0,08	0,10	0,11	0,11	0,11
Zement	0,14	0,16	0,05	0,05	0,05
Zementklinker	0,21	0,14	0,05	0,05	0,05
Kohle	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09
Kohlestaub	0,14	0,18	0,05	0,05	0,05
Koks	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09
Flugasche	0,14	0,12	0,05	0,05	0,05
Mehl	0,08	0,05	0,11	0,11	0,11
Eisenpellets	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09
Kalkhydrat	0,14	0,18	0,05	0,05	0,05
Kalksteinmehl	0,14	0,16	0,05	0,05	0,05
Mais	0,10	0,10	0,17	0,17	0,17
Phosphate	0,11	0,13	0,09	0,09	0,09
Kartoffeln	0,08	0,09	0,11	0,11	0,11
Sand	0,08	0,07	0,11	0,11	0,11
Schlackenklinker	0,08	0,07	0,11	0,11	0,11
Sojabohnen	0,08	0,12	0,11	0,11	0,11
Zucker	0,14	0,14	0,05	0,05	0,05
Zuckerrübenpellets	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09
Weizen	0,08	0,09	0,11	0,11	0,11

Anhang D (normativ)

Abschätzung der Schüttgutkennwerte für die Ermittlung der Silolasten

D.1 Ziel

Dieser Anhang beschreibt Methoden zur Abschätzung der Schüttgutkennwerte, die in dieser Norm für die Zwecke der Berechnung der Silolasten benötigt werden und nicht anhand von Versuchen experimentell bestimmt werden können.

D.2 Abschätzung des Wandreibungskoeffizienten für eine gewellte Wand

(1) Für die Wandart D4 (gewellt oder Profibleche oder Bleche mit horizontalen Schlitzern) ist der effektive Wandreibungskoeffizient zu ermitteln aus:

$$\mu_{\text{eff}} = (1 - a_w) \tan \varphi_i + a_w \mu_w \quad (\text{D.1})$$

Dabei ist

μ_{eff} der effektive Wandreibungskoeffizient;

φ_i der Winkel der inneren Reibung;

μ_w der Wandreibungskoeffizient (gegen eine ebene Wandoberfläche);

a_w der Wandkontaktfaktor.

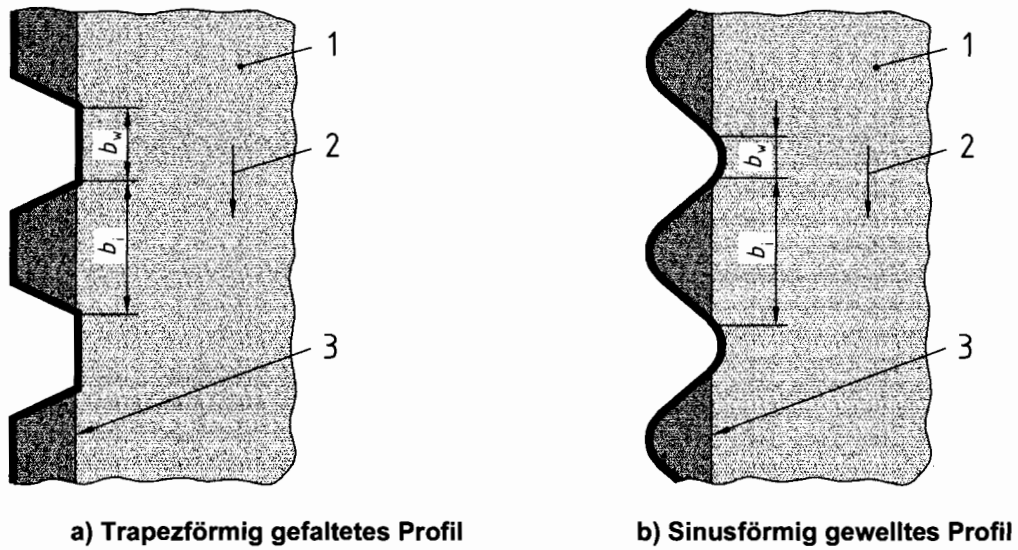
ANMERKUNG 1 Für den Wandtyp D4 hängt die effektive Wandreibung vom Winkel der inneren Reibung des Schüttgutes, dem Wandreibungskoeffizient gegen die ebene Wand und vom Profil der Wandoberfläche ab.

(2) Der Parameter a_w in Gleichung (D.1), der den Anteil der Gleitfläche gegen die Wandfläche repräsentiert, ist aus der Geometrie des Profils der Wandoberfläche unter Berücksichtigung einer geeigneten Abschätzung der aktivierten Kontaktbereiche zwischen Schüttgut und Wandoberfläche zu ermitteln (siehe Bild D.1).

(3) Bei entsprechenden Tiefen der Faltungen und Wellungen kann eine einfache Abschätzung nach Gleichung (D.2) erfolgen:

$$a_w = \frac{b_w}{b_w + b_i} \quad (\text{D.2})$$

ANMERKUNG 2 Die Trennfläche zwischen gleitenden und stehenden Zonen ist teilweise in Kontakt mit der Wand und teilweise eine Bruchfläche innerhalb des Schüttgutes. Der Anteil, der entlang der Wandfläche gleitet, wird durch den Faktor a_w ausgedrückt. Dieser Anteil lässt sich nicht einfach bestimmen und ist in Abhängigkeit von dem Profil der Wandoberfläche abzuschätzen.



Legende

- 1 Schüttgut
- 2 Schüttgutfluss
- 3 Gleitfläche

Bild D.1 — Abmessungen der Profilierung der Wandoberfläche

ANMERKUNG 3 Bei Profilierungen der Wandoberfläche, die dem in Bild D.1b dargestellten Profil ähneln, kann der Faktor a_w näherungsweise zu 0,20 angenommen werden.

D.3 Innere Reibung und Wandreibung eines grobkörnigen Schüttgutes ohne Feinanteile

Bei grobkörnigen Schüttgütern ohne Feinanteile (z. B. Lupine, Erbsen, Bohnen oder Kartoffeln) können der Wandreibungskoeffizient μ und Winkel der inneren Reibung φ_i nicht einfach bestimmt werden. Hier ist für den Winkel der inneren Reibung der Böschungswinkel φ_r eines auf eine ebene Grundplatte locker aufgeschütteten Schüttguthaufens (Schüttgutkegel) angenommen werden.

Anhang E (normativ)

Angabe von Schüttgutkennwerten

Dieser Anhang gibt Kennwerte für einige übliche in Silos gelagerte Schüttgüter an, die bei der Bemessung als charakteristische Werte zu verwenden sind.

Tabelle E.1 — Schüttgutkennwerte^a

Art des Schüttgutes	Wichte γ kN/m ³		Böschungswinkel φ_r Grad	Winkel der inneren Reibung φ_i Grad		Horizontallastverhältnis K		Wandreibungskoeffizient ^b μ ($\mu = \tan \varphi_w$) (Mittelwerte)				Kennwert für Teilflächenlast C_{op}
	unterer Wert γ_l	oberer Wert γ_u		Mittelwert φ_{im}	Umrechnungsfaktor a_{φ}	Mittelwert K_m	Umrechnungsfaktor a_K	Wandtyp D1	Wandtyp D2	Wandtyp D3	Umrechnungsfaktor a_{μ}	
Allgemeines Schüttgut	6,0	22,0	40	35	1,3	0,50	1,5	0,32	0,39	0,50	1,40	1,0
Betonkies	17,0	18,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,39	0,49	0,59	1,12	0,4
Aluminium	10,0	12,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5
Kraftfuttermischung	5,0	6,0	39	36	1,08	0,45	1,10	0,22	0,30	0,43	1,28	1,0
Kraftfutterpellets	6,5	8,0	37	35	1,06	0,47	1,07	0,23	0,28	0,37	1,20	0,7
Gerste	7,0	8,0	31	28	1,14	0,59	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,5
Zement	13,0	16,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5
Zementklinker ^c	15,0	18,0	47	40	1,20	0,38	1,31	0,46	0,56	0,62	1,07	0,7
Kohle	7,0	10,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,44	0,49	0,59	1,12	0,6
Kohlestaub	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5
Koks	6,5	8,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,6
Flugasche	8,0	15,0	41	35	1,16	0,46	1,20	0,51	0,62	0,72	1,07	0,5
Mehl	6,5	7,0	45	42	1,06	0,36	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,6
Eisenpellets	19,0	22,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,5
Kalkhydrat	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,20	0,36	0,41	0,51	1,07	0,6
Kalksteinmehl	11,0	13,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5
Mais	7,0	8,0	35	31	1,14	0,53	1,14	0,22	0,36	0,53	1,24	0,9
Phosphat	16,0	22,0	34	29	1,18	0,56	1,15	0,39	0,49	0,54	1,12	0,5
Kartoffeln	6,0	8,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,33	0,38	0,48	1,16	0,5
Sand	14,0	16,0	39	36	1,09	0,45	1,11	0,38	0,48	0,57	1,16	0,4
Schlackenklinker	10,5	12,0	39	36	1,09	0,45	1,11	0,48	0,57	0,67	1,16	0,6
Sojabohnen	7,0	8,0	29	25	1,16	0,63	1,11	0,24	0,38	0,48	1,16	0,5
Zucker	8,0	9,5	38	32	1,19	0,50	1,20	0,46	0,51	0,56	1,07	0,4
Zuckerrübenpellets	6,5	7,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,35	0,44	0,54	1,12	0,5
Weizen	7,5	9,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,24	0,38	0,57	1,16	0,5

ANMERKUNG Bei der Ermittlung der Silolasten ist immer der obere charakteristische Wert der Schüttgutwichte γ_u zu verwenden. Der untere charakteristische Wert γ_l in Tabelle E.1 ist zur Unterstützung von Berechnungen zur Lagerkapazitäten vorgesehen, wenn z. B. in einem Silo eine bestimmte vorgegebene Lagerkapazität sicherzustellen ist.

^a Wenn ein Schüttgut gelagert werden soll, welches nicht in der Tabelle aufgelistet ist, sind Versuche durchzuführen. Wenn sich der Aufwand für Versuche nicht rechtfertigt, insbesondere wenn eine Aufwandabschätzung ergibt, dass bei Verwendung einer großen Bandbreite der Bemessungswerte sich nur geringfügige Auswirkungen auf den Gesamtaufwand ergeben, können die Werte vom so genannten „Allgemeinen Schüttgut“ verwendet werden. Diese Werte können insbesondere für kleine Siloanlagen angemessen sein. Bei großen Siloanlagen werden sie im Allgemeinen jedoch zu einer unwirtschaftlichen Bemessung führen. Hier sind Versuche in der Regel zu bevorzugen.

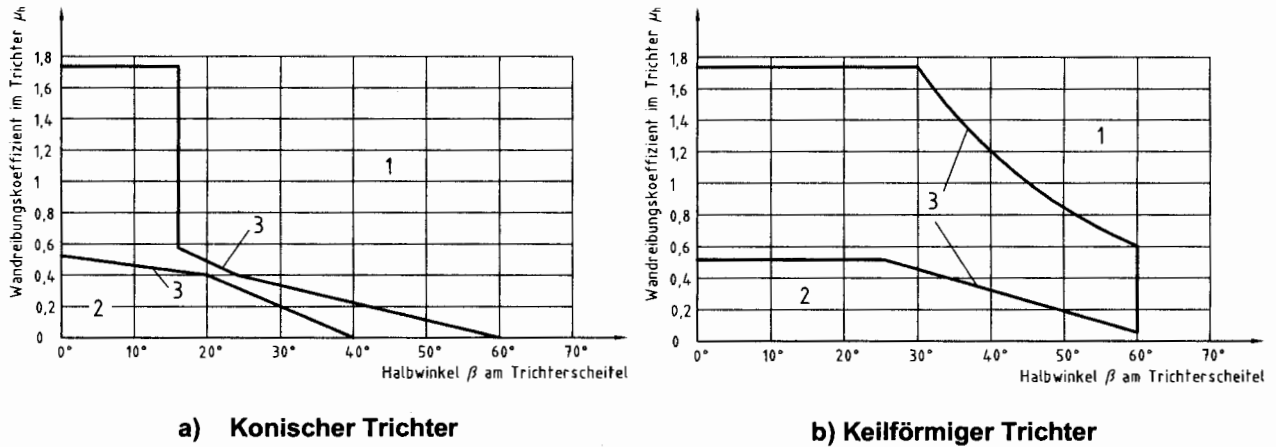
^b Der effektive Wandreibungskoeffizient für Wandtyp D4 (gewellte Wand) kann nach D.2 abgeschätzt werden.

^c Schüttgut neigt zu einem mechanischen Verzahnen und somit zur Brückenbildung oder zu Auslaufstörungen.

Anhang F (normativ)

Bestimmung der Fließprofile, Massen- und Kernfluss

Die funktionale verfahrenstechnische Bemessung des Silos in Hinblick auf das Fließprofil ist außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Norm. Die folgenden Informationen werden bereitgestellt, um die Möglichkeit einer auf der sicheren Seite liegenden Abschätzung zu geben, ob in einem zu bemessenden Silo spezielle Lastverhältnisse für Massenflussbedingungen vorliegen. Diese Information wird zudem benötigt, wenn das alternative Verfahren zur Ermittlung der Trichterlasten nach Anhang H verwendet wird.



Legende

- 1 Kernfluss
- 2 Massenfluss
- 3 zwischen den beiden Linien kann Massen- oder Kernfluss auftreten

Bild F.1 — Abgrenzung von Massen- und Kernflussbedingungen bei konischen und keilförmigen Trichtern

ANMERKUNG In der Zone zwischen den Grenzlinien von Massen- und Kernfluss hängt das sich einstellende Fließprofil von weiteren Parametern ab, die nicht in dieser Norm enthalten sind.

Anhang G (normativ)

Seismische Einwirkungen

G.1 Allgemeines

(1) Dieser Anhang liefert allgemeine Richtlinien zur Bemessung von Silos unter seismischen Einwirkungen. Diese Bemessungsregeln ergänzen die allgemeinen Regeln von DIN 4149 zur Berechnung von Konstruktionen unter seismischen Einwirkungen.

(2) Der Wert der Erdbebenbeschleunigung für die Silostruktur ist nach EN 1998 anzusetzen.

G.2 Symbole

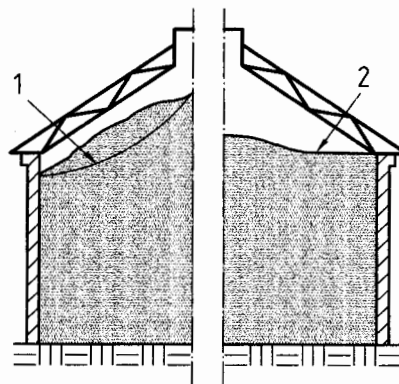
α horizontale Erdbebenbeschleunigung

$\Delta p_{h,so}$ zusätzliche Horizontallasten infolge von seismischen Einwirkungen

G.3 Bemessungssituation

Es sind folgende Bemessungssituationen zu betrachten:

- Horizontalbeschleunigungen und daraus resultierende horizontale und vertikale Lasten auf die Silostützen (bzw. Silounterbau) und die Gründung (G.4.1);
- zusätzliche Lasten auf die Silowände (G.4.2);
- Schüttgutumlagerungen an der Schüttgutoberfläche des gefüllten Silos. Die seismischen Einwirkungen können dazu führen, dass sich im aufgeschütteten Schüttgutkegel nahe der Schüttgutoberfläche eine Gleitfläche ausbildet. Dies kann zu einer Gefährdung für das Silodach und für die oberen Bereiche der Silowände durch zusätzliche horizontale Belastungen führen (siehe Bild G.1).



Legende

- 1 Gleitfläche während der seismischen Einwirkung
- 2 Schüttgutoberfläche nach der seismischen Einwirkung

Bild G.1 — Mögliche Umlagerungen an der Schüttgutoberfläche infolge seismischer Einwirkungen

G.4 Seismische Einwirkungen

Anleitungen zur Berechnung der seismischen Einwirkungen sind für den Silounterbau und die Gründung in G.4.1, für die Silowände in G.4.2 gegeben.

G.4.1 Silounterbau und Gründungen

Seismische Einwirkungen infolge der beschleunigten Masse der Silokonstruktion und des gelagerten Schüttgutes können als Einzellasten berücksichtigt werden, die im Massenschwerpunkt der Silokonstruktion und des Schüttgutes angreifen (siehe Bild G.2).

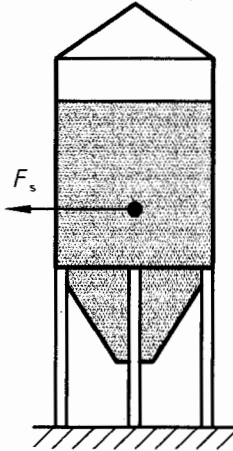


Bild G.2 — Seismische Einwirkungen für den Unterbau (z. B. Stützen)

G.4.2 Silowände

(1) Die Auswirkung von seismischen Einwirkungen auf die Silowände ist durch einen zusätzlichen Horizontallastanteil zu berücksichtigen. Dieser ist mit den Lasten aus dem gespeicherten Schüttgut nach den Abschnitten 7 und 8 zu überlagern. Die Gesamtlast ist äquivalent zu der Masse des Schüttgutes multipliziert mit dem Wert der horizontalen Erdbebenbeschleunigung α .

(2) Der Referenzwert der zusätzlichen Normallasten auf die Silowand infolge von seismischen Einwirkungen ist für einen Silo mit kreisförmigem Querschnitt mit dem Durchmesser d_c gegeben durch:

$$\Delta p_{h,so} = \gamma \frac{\alpha d_c}{g} \quad (G.1)$$

und für einen rechteckigen Silo mit der Breite b :

$$\Delta p_{h,so} = \gamma \frac{\alpha b}{g} \quad (G.2)$$

Dabei ist

- γ die Schüttgutwichte;
- α die Horizontalbeschleunigung der seismischen Einwirkung;
- g die Fallbeschleunigung.

(3) Die zusätzlichen Lasten normal auf die Silowand können als über die Silohöhe konstant verteilt angenommen werden. Am oberen Ende der Silowand ist die von innen nach außen wirkende Resultierende aus Schüttgutlasten – infolge von Füllen und Entleeren – und der seismischen zusätzlichen Horizontallasten niemals kleiner als null (keine negativen Werte) anzusetzen.

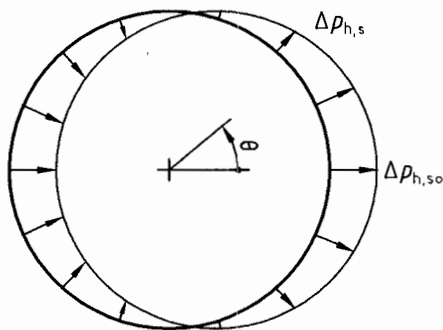
(4) Die anzunehmende horizontale Verteilung der zusätzlichen Lasten $\Delta p_{h,s}$ zeigt Bild G.3.

Bei einem kreisförmigen Silo ist die zusätzliche Last $\Delta p_{h,s}$ nach Gleichung (G.3) anzunehmen:

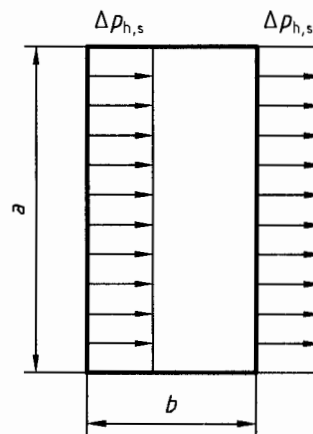
$$\Delta p_{h,s} = \Delta p_{h,so} \cos \theta \quad (G.3)$$

Bei einem rechteckigen Silo ist $\Delta p_{h,s}$ nach Gleichung (G.4) anzusetzen:

$$\Delta p_{h,s} = \Delta p_{h,so} \quad (G.4)$$



a) kreisförmiger Siloquerschnitt



b) rechteckiger Siloquerschnitt

Bild G.3 — Querschnitt durch den vertikalen Siloschaft mit Angaben zu den zusätzlichen Horizontallasten infolge seismischer Einwirkungen

Anhang H (normativ)

Alternative Regeln zur Ermittlung von Trichterlasten

H.1 Allgemeines

- (1) Dieser Anhang gibt zwei alternative Verfahren zur Abschätzung von Schüttgutlasten auf Trichter an.
- (2) H.5 kann zur Beschreibung der Lasten sowohl für den Lastfall Füllen als auch für den Lastfall Entleeren verwendet werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Summe dieser Lasten nicht mit dem Gewicht des im Trichter gelagerten Schüttgutes korrespondiert. Der angegebene Lastansatz im Trichter ist als eine Einhüllende der während des Füllens und Entleerens auf die Trichterwände wirkenden Lastprofile zu betrachten.
- (3) Die Gleichungen nach H.7 können alternativ zu den nach 8.3 angegebenen Ansätzen bei steilen Trichtern für den Lastfall Entleeren verwendet werden.

H.2 Begriffe

Für die Anwendung dieses Anhangs gilt der folgende Begriff

H.2.1

Lastspitze (en: kick load)

Lastspitze, die während des Entleerens eines Silos bei Auftreten eines Massenflusses am Trichterübergang auftreten kann

H.3 Symbole

- l_h Abstand zwischen der Trichterspitze und dem Trichterübergang entlang der geneigten Fläche (siehe Bild H.1)
- p_n Lasten senkrecht auf die geneigte Trichterwand
- p_{ni} unterschiedliche Lastkomponenten senkrecht auf die geneigte Trichterwand ($i = 1, 2$ und 3)
- p_s Lastspitze am Trichterübergang

H.4 Bemessungssituation

- (1) Der Trichter ist für den Zustand nach dem Füllen und für den Lastfall Entleeren zu bemessen.

ANMERKUNG Die Resultierende der Lastanteile kann als Einhüllende der in den Lastfällen Füllen und Entleeren möglichen Lastspitzen im Trichter angesehen werden. Es ist zu beachten, dass kein Gleichgewicht zwischen Lasten am Trichterübergang und Eigenlasten einerseits und den Lasten auf die Trichterwände andererseits besteht.

- (2) Das für den Trichter zu erwartende Fließverhalten des Schüttgutes ist unter Anwendung von Bild F.1 zu bestimmen.

- (3) Falls im Silo sowohl Kern- als auch Massenfluss auftreten können, sind bei der Bemessung die Auswirkungen aus beiden Fließprofilen zu berücksichtigen.

H.5 Lasten auf die Trichterwände

(1) Bei einer Neigung der Trichterwände gegen die Horizontale α von größer als 20° (siehe Bild 1b) sind die Lasten senkrecht auf die geneigten Trichterwände p_n wie folgt zu berechnen:

ANMERKUNG Siehe ANMERKUNG in H.4.

$$p_n = p_{n3} + p_{n2} + (p_{n1} - p_{n2}) x/l_h \quad (\text{H.1})$$

mit:

$$p_{n1} = p_{vf} (C_b \sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \quad (\text{H.2})$$

$$p_{n2} = p_{vf} C_b \sin^2 \beta \quad (\text{H.3})$$

$$p_{n3} = 3,0 \frac{A}{U} \frac{\gamma K_s}{\sqrt{\mu_h}} \cos^2 \beta \quad (\text{H.4})$$

Dabei ist

- β die Neigung der Trichterwände gegen die Vertikale (siehe Bild H.1);
- x der Abstand zwischen unterem Trichterende und betrachteter Stelle (Betrag zwischen 0 und l_h) nach Bild H.1 (bezogen auf die geneigte Fläche);
- p_{n1} und p_{n2} Anteile zur Beschreibung der Trichterlasten infolge Trichterfüllung;
- μ_h der untere charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten im Trichter;
- K_s der obere charakteristische Wert des Horizontallastverhältnisses des gespeicherten Schüttgutes;
- p_{n3} der Anteil des Lastanteiles infolge der Vertikaldrücke des im vertikalen Siloschaft gelagerten Schüttgutes am Trichterübergang/Trichteransatzpunkt;
- C_b der Bodenlastvergrößerungsfaktor;
- p_{vf} die Vertikallast am Trichteransatzpunkt nach dem Füllen nach der Gleichung (11) oder (86).

(2) Die Wandreibungslasten p_t ergeben sich zu:

$$p_t = p_n \mu_h \quad (\text{H.5})$$

Dabei sind p_n die Trichterlasten senkrecht zur Trichterwand nach Gleichung (H.1).

(3) Bei Silos mit möglichem Massenfluss ist ein zusätzlicher Lastanteil p_s am Trichterübergang (siehe Bild H.1) zu berücksichtigen. Dieser Lastanteil ist vom Trichterübergang aus gemessen über eine Länge von $0,2d_c$ und über den gesamten Trichterumfang wirkend anzusetzen.

$$p_s = 2 K p_{vft} \quad (\text{H.6})$$

Dabei ist

- p_{vft} der vertikale Lastanteil im Schüttgut am Trichteransatzpunkt des Lastfalles Füllen, ermittelt nach der Gleichung (11) oder (86).

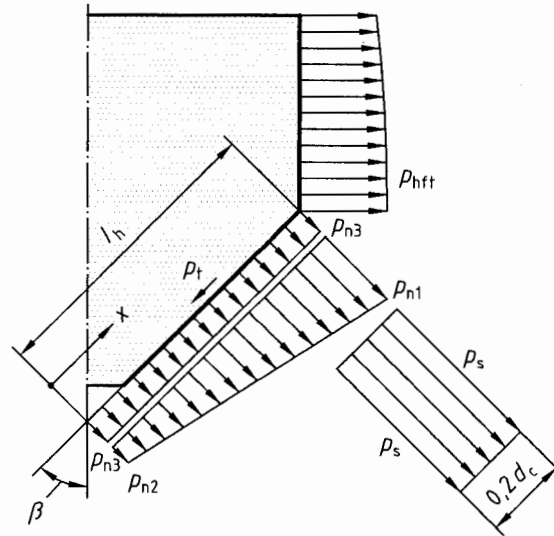


Bild H.1 — Alternative Regeln für die Trichterlasten

H.6 Bestimmung der Anschlusskräfte am Trichterübergang

Die Anschlusskräfte des Trichters am Trichterübergang sind aus Gleichgewichtsbedingungen herzuleiten. Bei der Last aus der Trichterüberschüttung ist der Bodenlastvergrößerungsfaktor C_b anzusetzen.

H.7 Alternative Gleichungen für den Trichterlastbeiwert F_e für den Lastfall Entleeren

In einem Trichter mit steilen Trichterwänden ist im Lastfall Entleeren der mittlere Vertikaldruck an beliebiger Stelle im Schüttgut nach den Gleichungen (116) und (117) unter Verwendung des folgenden Parameters F_e zu berechnen:

$$F_e = \left(\frac{1}{1 + \mu \cot \beta} \right) \left\{ 1 + 2 \left[1 + \left(\frac{\sin \phi_i}{1 + \sin \phi_i} \right) \left(\frac{\cos \varepsilon \sin(\varepsilon - \beta)}{\sin \beta} \right) \right] \right\} \quad (\text{H.7})$$

wobei:

$$\varepsilon = \beta + \frac{1}{2} \left(\phi_{wh} + \arcsin \left\{ \frac{\sin \phi_{wh}}{\sin \phi_i} \right\} \right) \quad (\text{H.8})$$

$$\phi_{wh} = \arctan \mu_h \quad (\text{H.9})$$

Dabei ist

μ_h der untere charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten im Trichter;

ϕ_i der Winkel der inneren Reibung des gespeicherten Schüttgutes.

ANMERKUNG. Die Gleichung (H.7) ist anstatt der Gleichung (128) zu verwenden. Die Gleichung (H.7) für F_e basiert auf der für die Entleerungsdrücke etwas komplexeren Theorie von Enstad.

Anhang I (normativ)

Einwirkungen infolge von Staubexplosionen

I.1 Allgemeines

Dieser Anhang enthält Hinweise zur Berücksichtigung von Staubexplosionen in Siloanlagen.

I.2 Anwendung

(1) Dieser Anhang gilt für alle Siloanlagen und vergleichbare Anlagen, bei deren Betrieb brenn- und explosionsfähige, nichttoxische Stäube bearbeitet oder gelagert werden oder als Abfall in größerer Menge anfallen.

(2) Er gilt nicht für Anlagenteile, in denen durch gezielte Maßnahmen Explosionen ausgeschlossen werden.

(3) Für die Nachrüstung bestehender Anlagen kann dieser Anhang sinngemäß angewendet werden. Dabei ist der tatsächliche Zustand der Anlage zu berücksichtigen und nicht der Planungszustand. Im Zweifelsfall ist eine sachkundige Beratung einzuholen.

I.3 Zusätzliche Normen, Richtlinien und Bestimmungen

Nachfolgend werden zusätzliche Normen, Richtlinien und Bestimmungen aufgeführt, die für die Planung und für den Betrieb einer Siloanlage zu beachten sind.

- DIN-Fachbericht 140, *Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen*
- DIN EN 26184-1, *Explosionsschutzsysteme — Teil 1: Bestimmung der Explosionskenngrößen von brennbaren Stäuben in Luft*
- DIN EN 1127-1, *Explosionsfähige Atmosphären — Explosionsschutz — Teil 1: Grundlagen und Methodik*
- DIN EN 50014, *Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche — Allgemeine Bestimmungen*
- VDI 2263, *Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen*
- VDI 3673 Blatt 1, *Druckentlastung von Staubexplosionen*

I.4 Explosionsfähige Stäube und ihre Kennwerte

(1) Die Stäube vieler Schüttgüter, die üblicherweise in Siloanlagen gelagert werden, sind explosionsfähig. Explosionen können auftreten, wenn vorhandene organische oder anorganische Stäube mit hinreichend kleiner Partikelgröße exotherm mit Sauerstoff reagieren und damit eine rasch fortschreitende Reaktion ermöglichen.

(2) Während einer Explosion von Stäuben aus üblichen in Silos gelagerten Schüttgütern können in geschlossenen Räumen ohne Entlastungsöffnungen Überdrücke von 8 bar bis 10 bar entstehen.

DIN 1055-6:2005-03

(3) Die Kennwerte für das Explosionsverhalten eines Staubes sind:

- der Staubkennwert K_{St} ,
- der maximale Explosionsüberdruck p_{max} .

(4) Der Staubkennwert K_{St} entspricht der maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeit dp/dt .

(5) Beide Kennwerte sind nach genormten Verfahren bestimmt (siehe DIN-Fachbericht 140 und DIN EN 26184-1).

(6) Die wichtigsten explosionsfähigen Staubarten sind: Braunkohle, Cellulose, Erbsenmehl, Flugasche, Futtermittel, Kraffuttergemische, Gerste, Getreidemehl, Gummi, Harz, Holz, Holzmehl, Kaffee, Kartoffelmehl, Koks, Maismehl, Maisstärke (getrocknet), Milchkpulver, Papier, Pigmente, Sojaschrot, Sojamehl, Steinkohle, Weizenmehl, Waschmittel und Zucker.

1.5 Zündquellen

Für die Zündung dieser Stäube reichen im Allgemeinen kleine Energiemengen aus. Insbesondere kommen in Silozellen und Nebenräumen wie z. B. Silokellern, Verbindungsgängen und Treppenhäusern folgende Zündquellen in Betracht:

- heiße Oberflächen, die z. B. durch Reibung schadhafter Anlagenteile entstehen, oder Funken z. B. durch Fremdkörper in Fördereinrichtungen, Funken beim Schweißen, Schleifen und Schneiden während Reparaturarbeiten, Glimmnester, die auch von außen mit dem Schüttgut in die Silozelle eingetragen werden können;
- ungeeignete oder schadhafte elektrische Betriebsmittel (z. B. Glühlampen);
- Hitzeentwicklung von Trocknern;
- Selbstzündung durch elektrostatische Entladung.

1.6 Schutzmaßnahmen

(1) Die Schäden infolge einer Staubexplosion lassen sich dadurch minimieren, dass das Auftreten der Explosion möglichst auf den Bereich eingegrenzt wird, in dem die Entzündung auftritt. Hierzu müssen Explosionsabschnitte ausgebildet werden. Ein Überspringen der Explosionen auf andere Gebäudeabschnitte ist zu vermeiden. Die auftretenden Explosionsüberdrücke sind zu minimieren.

(2) Die Folgen einer Explosion können durch geeignete Vorsorgemaßnahmen während der Planung vermindert werden (z. B. durch das Vorsehen und konstruktive Ausbilden entsprechender Explosionsabschnitte).

(3) Die einzelnen Gebäudeabschnitte zwischen den Explosionsbarrieren sind für eine der beiden folgenden Bedingungen zu bemessen:

- wenn keine Druckentlastung vorgesehen ist, müssen die Abschnitte für den maximalen Explosionsüberdruck p_{max} bemessen werden,
- wenn eine geeignete Entlastung vorgesehen wird, müssen die Abschnitte mit dem größten reduzierten Explosionsüberdruck p_{red} bzw. $p_{red,ges}$ bemessen werden.

(4) Die Beträge der reduzierten Explosionsüberdrücke p_{red} bzw. $p_{red,ges}$ hängen von der Art des Staubes, der Größe des zu entlastenden Abschnittes und der Entlastungsöffnungen, dem Ansprechdruck und der Trägheit des Entlastungssystems ab.

(5) Der durch eine Entlastungsöffnung austretende Feuerstrahl darf weder zu einer Beeinträchtigung der Umgebung führen noch die Explosion in einen anderen Explosionsabschnitt weiterleiten.

(6) Menschen dürfen nicht durch Splitter von Scheiben oder anderen Bauteilen gefährdet werden. Druckentlastungsöffnungen sollen deshalb direkt ins Freie führen, bei Silozellen vor allem über Dachflächen und bei anderen Räumen, wie z. B. Silokellern, Verbindungsgängen und Treppenhäusern, über hochliegende Fensterflächen.

(7) Das Entlastungssystem sollte einen möglichst geringen Ansprechdruck und eine niedrige Massenträgheit aufweisen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei einem frühen Ansprechen eines Entlastungssystems eine wesentlich größere Menge des brennbaren Staub-Luft-Gemisches weitergeleitet wird als bei trägeren Systemen.

1.7 Bemessung der Bauteile

Die Bemessung der betroffenen Bauteile ist nach den Regeln für außergewöhnliche Lasten (Katastrophenlastfälle) durchzuführen.

1.8 Bemessung für Explosionsüberdruck

(1) Für den Bemessungsdruck sind alle tragenden und raumabschließenden Bauteile eines Explosionsabschnittes auszulegen.

(2) Die Bemessungsdrücke sollten nach den Verfahren des DIN-Fachberichts 140 ermittelt werden.

1.9 Bemessung für Unterdruck

Nach einer Druckentlastung kann sich infolge der Massenträgheitskräfte bei schneller Gasausströmung und nachfolgender Abkühlung der heißen Rauchgase im Explosionsraum ein Unterdruck einstellen, der bei der Bemessung der umschließenden Bauteile und der Bauteile, die im Strömungsquerschnitt liegen, zu berücksichtigen ist.

1.10 Sicherung der Abschlusselemente der Entlastungsöffnungen

(1) Alle Abschlusselemente sind gegen Wegfliegen infolge des Explosionsdruckes zu sichern, z. B. Klappen durch Gelenke, Deckel durch Auffangkonstruktionen, Seile o. ä. Befestigungen.

(2) Die Geschwindigkeiten der bewegten Abschlusselemente zur Ermittlung der Verankerungskräfte können mit dem Berechnungsverfahren aus dem DIN-Fachbericht 140 ermittelt werden.

1.11 Rückstoßkräfte durch Druckentlastung

(1) Bei der Druckentlastung treten Rückstoßkräfte auf, die beim Standsicherheitsnachweis gegebenenfalls berücksichtigt werden müssen. Dies ist insbesondere bei leichten Konstruktionen mit horizontalen und unsymmetrisch über den Querschnitt verteilten Entlastungsöffnungen zu prüfen.

(2) Die Rückstoßkräfte können nach den Angaben im DIN-Fachbericht 140 ermittelt werden.